



## Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport

Nielsen, Anker; Korsgaard, Vagn

*Publication date:*  
1974

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Nielsen, A., & Korsgaard, V. (1974). *Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport*. Technical University of Denmark. Byg Rapport No. 029

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

meddelelse nr 29



FUGTFORDELINGER I GASBETON  
UNDER

VARME— OG FUGTTRANSPORT

Moisture distributions in cellular concrete  
during heat— and moisture transfer

Anker F. Nielsen

MARTS 1974



INDHOLDSFORTEGNELSE	SIDE
ANVENDTE SYMBOLER OG ENHEDER .....	6
FORORD .....	8
1. INDLEDNING .....	9
2. FYSISK GRUNDLAG .....	10
2.1. Vand .....	10
2.2. Binding til materiale .....	11
2.2.1. Adsorption .....	12
2.2.2. Kapillar kondensation .....	14
2.2.3. Osmotisk binding .....	15
2.3. Sorptionskurver .....	15
2.4. Fugttransportformer .....	18
2.4.0. Indledning .....	18
2.4.1. Damptransport .....	18
2.4.2. Væsketransport .....	20
2.4.3. Temperaturafhængig transport .....	22
2.4.4. Totaltryksafhængig transport .....	22
2.5. Transportligninger .....	23
2.5.0. Indledning .....	23
2.5.1. 3 ligninger med 3 potentialer .....	23
2.5.2. 2 ligninger med 2 potentialer .....	24
2.5.3. Enkelt ligning .....	25
2.5.4. Alternativ beskrivelse (suction) .....	26
3. MATERIALET .....	27
3.0. Indledning .....	27
3.1. Fremstilling og struktur .....	27
3.2. Provelegemer .....	28
3.3. Sorptionskurven .....	32
3.4. Porestørrelsesfordelingen .....	37
3.5. SEM-billeder .....	39



4.	MÅLING AF FUGTINDHOLD .....	42
4.1.	Målemetoder .....	42
4.2.	Gammatransmissionsmåling .....	45
4.2.0.	Indledning .....	45
4.2.1.	Teori .....	45
4.2.2.	Statistik .....	46
4.2.3.	Måleudstyr .....	47
4.2.4.	Kalibrering .....	49
4.2.5.	Måling og beregning af fugtindhold .....	50
5.	UDTØRRING .....	55
5.0.	Indledning .....	55
5.1.	KRISCHER's teori for udtørring .....	55
5.1.1.	Forsøgsresultater .....	57
5.1.2.	Beregning af kapillarledningstallet .....	59
5.1.3.	Teorier for kombineret varme- og fugttransport .....	62
5.2.	Forsøgsopstilling .....	63
5.3.	Forsøgsresultater .....	70
5.3.1.	Udtørring af prøvelegeme nr. 197 .....	70
5.3.1.1.	Beregning af kapillarledningstallet .....	78
5.3.2.	Udtørring af prøvelegeme nr. 198 .....	88
5.3.3.	Udtørring af prøvelegeme nr. 188 .....	92
5.3.4.	Udtørring af prøvelegeme nr. 173 .....	95
5.3.5.	Udtørring af prøvelegeme nr. 185 .....	101
5.4.	Sammenligninger med andres forsøg .....	101
6.	KONDENSATION I HOMOGENE MASSIVE TAGE .....	108
6.0.	Indledning .....	108
6.1.	Teorier .....	108
6.2.	Nyere, modificeret beregningsmåde .....	113
6.3.	Forsøgsopstilling .....	115
6.4.	Forsøgsresultater .....	118
6.4.0.	Indledning .....	118
6.4.1.	Kondensation i prøvelegeme nr. 162 .....	118
6.4.2.	Kondensation i prøvelegeme nr. 170 .....	126
6.4.3.	Kondensation i prøvelegeme nr. 156 .....	133
6.4.4.	Kondensation i prøvelegeme nr. 163 .....	138

6.5.	Beregning af fugttransportkoefficienterne ..	138
	ud fra ikke-stationære tilstande	
6.6.	Sammenligning med tidligere resultater .....	147
7.	BEREGNING AF IKKE-STATIONÆR FUGTTRANSPORT ..	151
7.0.	Indledning .....	151
7.1.	Udledning af differentialligning for .....	152
	fugttransporten	
7.2.	Anvendelse af EDB .....	154
7.3.	Programdata til beregninger .....	154
7.4.	Beregningseksempler .....	157
7.5.	Virkning af faktorerne .....	164
7.6.	Sammenligninger med forsøg .....	165
8.	KONKLUSION .....	166
	RESUMÉ .....	170
	SUMMARY .....	174
	LITTERATURFORTEGNELSE .....	178
	APPENDIX 1 Opsugning .....	182
	APPENDIX 2 EDB-programmer .....	187

## ANVENDTE SYMBOLER OG ENHEDER

c	$[\text{kg/m}^3]$	vanddampkoncentration
d	$[\text{m}]$	diameter
g	$[\text{kg/m}^2\text{s}]$	fugtstrøm
h	$[\text{m}]$	højde
p	$[\text{Pa}=\text{N/m}^2]$	vanddampptryk (umættet)
p'	$[\text{Pa}]$	vanddamps mætningstryk
q	$[\text{W/m}^2]$	varmestøm
r	$[\text{m}]$	radius
t	$[\text{s}]$	tid
x	$[\text{m}]$	koordinat
y	$[\text{m}]$	koordinat
z	$[\text{m}]$	koordinat
A	$[\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}]$	kapillaritetstal
B	$[\text{m/s}^{0,5}]$	indtrængningstal
D	$[\text{m}^2/\text{s}]$	kapillarledningstal
K	$[\text{kg/m s K}]$	termo-diffusionstal
P	$[\text{Pa}]$	totaltryk
R	$[\text{J/kg K}]$	gaskonstant
T	$[\text{K}]$	temperatur
$\alpha$	$[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	varmeovergangstal
$\beta$	$[\text{s/m}]$	fugtovergangstal (ligning $g=\beta$ grad p)
$\epsilon$	$[\text{K}^{-1}]$	temperaturgradientfaktor
$\delta(\delta_p)$	$[\text{s}]$	diffusionstal (ligningen $g = -\delta$ grad p)
$\delta_c$	$[\text{m}^2/\text{s}]$	diffusionstal (ligningen $g = -\delta_c$ grad c)
$\vartheta$	$[\text{°C}]$	temperatur
$\lambda$	$[\text{W/m K}]$	varmeledningstal
$\rho$	$[\text{kg/m}^3]$	densitet
$\sigma$	$[\text{Pa m}]$	overfladespænding
$\varphi$	$[-]$	relativ fugtighed
$\psi$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$	fugtindhold

Der findes desuden i afsnit 2. og 4. andre symboler, som, da de kun findes enkelte gange, kun er omtalt, hvor de nævnes.

# SYMBOLS AND UNITS APPLIED

c	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration
d	[m]	diameter
g	[kg/m <sup>2</sup> s]	density of mass flow rate
h	[m]	height
p	[Pa=N/m <sup>2</sup> ]	vapour pressure
p'	[Pa]	maximum vapour pressure
q	[W/m <sup>2</sup> ]	density of heat flow rate
r	[m]	radius
t	[s]	time
x	[m]	cartesian coordinate
y	[m]	cartesian coordinate
z	[m]	cartesian coordinate
A	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ]	water absorption coefficient
B	[m/s <sup>0,5</sup> ]	coefficient of water penetration
D	[m <sup>2</sup> /s]	water diffusivity
K	[kg/m s K]	thermal moisture conductivity
P	[Pa]	pressure
R	[J/kg K]	gasconstant
T	[K]	temperature
α	[W/(m <sup>2</sup> K)]	surface coefficient of heat transfer
β	[s/m]	surface coefficient of mass transfer
ε	[K <sup>-1</sup> ]	temperature gradient factor
δ(δ <sub>p</sub> )	[s]	coefficient of moisture conductivity (equation g = -δ grad p)
δ <sub>c</sub>	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient of moisture conductivity (equation g = -δ <sub>c</sub> grad c)
θ	[°C]	temperature
λ	[W/m K]	coefficient of thermal conductivity
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	specific mass, density
σ	[Pa m]	surface tension
φ	[-]	relative humidity
ψ	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	moisture content

In chapter 2. and 4. there are other symbols which are only used a few times. They are explained (in Danish) where they are found.

## FORORD

Denne afhandling er et led i betingelserne for erhvervelsen af den tekniske licentiatgrad ved Danmarks tekniske Højskole. Licentiatstudiet er udført ved Laboratoriet for Varmeisolering med professor Vagn Korsgaard som faglærer.

Statens teknisk-videnskabelige Fond har finansieret opbygningen af de nødvendige forsøgsopstillinger. Forsøgsmateriale er velvilligst stillet til rådighed af H+H Gasbeton A/S.

Selv om afhandlingens indhold i det store og hele kun er af interesse for dem, som driver forsknings- og udviklingsarbejde, er det mit håb, at dele af afhandlingen kan føre til praktisk anvendelige resultater for byggeriet.

Jeg vil gerne takke professor V. Korsgaard og laboratoriets medarbejdere for deres interesse og samarbejde under opbygningen og udførelsen af dette forskningsarbejde. Jeg vil særligt takke civilingeniør Mogens Byberg for mange interessante diskussioner samt laboratoriets sekretær Elin van Kooten for det store arbejde med at renskrive manuskriptet.

Lyngby, marts 1974

Anker Nielsen

## 1. INDLEDNING

Størstedelen af alle byggeskader skyldes større eller mindre mængder fugt eller følgevirkninger af fugt. Da disse skader årligt koster millionbeløb, og da en del vil kunne forebygges ved et bedre kendskab til fugttransporten og de kræfter, der styrer den, har Laboratoriet for Varmeisolering startet et fugtforskningsprogram, hvortil dette arbejde hører. Fugtforskningen har i mange år haltet væsentligt efter varmemforskningen, bl.a. på grund af, at fugt- og varmetransport ikke kan adskilles. Ved varme-transport kan man ved at bruge tørre materialer undgå indflydelsen fra fugt. Noget tilsvarende kan ikke gøres for fugttransport. Et andet væsentligt problem for fugtforskerne har været, at man ikke har et entydigt fugtpotential ligesom varmpotential (temperaturen).

Fugttransport i klimaskærmen foregår langsomt og afhænger derfor af udeklimaet, hvoraf følger, at transporten normalt er ikke-stationær. Dette medfører, at stationære fugttransportligninger er ubrugelige til behandling af mange af de problemer, som findes i bygninger, f.eks. kondensation. Fra litteraturen vides, at fugttransportkoefficienterne (diffusionstallet, kapillärledningstallet og termodiffusionstallet) er afhængige af fugtindholdet og temperaturniveauet i materialet.

Den ikke-stationære beregning af fugtforholdene bliver derfor meget besværlig at arbejde med, hvis man ikke anvender EDB til beregningerne. Gør man det, er det til gengæld relativt simpelt at tage hensyn til fugttransportkoefficienternes variationer. Et sådant program er udviklet på Laboratoriet for Varmeisolering, og det kan beregne fugtvariationerne i et tag eller en væg. Det største problem ved et sådant program er at skaffe oplysninger om transportkoefficienternes variation.

Denne afhandling indeholder målinger af fugttransportkoefficienter fundet ud fra udtørnings- og tagkondensationsforsøg i laboratoriet. Der findes desuden en beskrivelse af et EDB-program til beregning af tagkondensation.

## 2. FYSISK GRUNDLAG

### 2.1. Vand

Transport af vand og binding af vand til materialer er meget afhængig af vandets egenskaber.

Vands væsentligste egenskab er, at det ved de temperaturer, som forekommer ved almindelige bygningskonstruktioner, kan forekomme såvel i dampfase (vanddamp), væskefase (vand) som i fast form (is). Da disse faser i mange tilfælde findes samtidigt, vil fugttransporten i de fleste tilfælde ske som en blanding af flere transportformer. En fysisk beskrivelse af fugttransport bliver derved meget kompliceret. Samtidigt vil man rent makroskopisk have en ligevægt mellem mængderne af de 3 faser:



Ved disse omsætninger mellem faserne frigøres eller bindes der varme, og man får hermed en antydning af, at fugt- og varmetransport hører nøje sammen. Vands fordampningsvarme ved  $100^{\circ}\text{C}$  er  $2260 \cdot 10^3 \text{ J/kg vand}$ . Isens smeltevarme er  $330 \cdot 10^3 \text{ J/kg vand}$ .

Vandmolekylet ( $\text{H}_2\text{O}$ ) har en effektiv diameter på ca.  $3,5 \text{ \AA}$  og kan derfor trænge ind i selv meget små porer. Vandmolekylet har som følge af, at det er usymmetrisk opbygget med en valensvinkel på  $105^{\circ}$ , et ret stort dipolmoment. Dette har en væsentlig betydning for tiltrækningen og adsorptionen af vand på materialeoverflader.

Da densiteten for is er ca.  $900 \text{ kg/m}^3$  og for vand ca.  $1000 \text{ kg/m}^3$ , vil frysning af vand medføre en volumenforøgelse på ca. 9%. Denne forøgelse kan give anledning til frostsprængning af materialer, hvori der findes vand.

Overfladespændingen for vand er på 0,073 N/m ved 20°C og større end for de fleste andre væsker. Dette får betydning for kapillarkræfternes størrelse.

Vand findes altid i atmosfæren i dampform, men mængden er variabel. Der findes et maksimalt indhold af vand, som målt i kg vand pr. kg tør luft kun afhænger af luftens temperatur og barometerstanden. Ved det maksimale fugtindhold siges luften at være mættet med vanddamp. Luftens fugtighed kan måles ved brug af hygrometre eller dugpunktsmålere.

## 2.2. Binding til materiale

Som tidligere nævnt har vandets egenskaber væsentlig betydning for bindingen til materiale, men det er i lige høj grad en vekselvirkning mellem vandet og materialet.

Fugten bindes til materialet på grund af en række kemiske og fysiske processer, som giver anledning til bindingskræfter. Normalt foretager man kun en meget grov inddeling efter:

- 1) kemisk binding
- 2) fysisk binding

Denne opdeling har betydning f. eks. ved udtørring af materialer i en ovn ved 105°C. Det fysisk bundne vand vil ved udtørringen fordampe, og kun det kemisk bundne vand, som findes som hydroxylioner og krystalvand, er tilbage. Det må understreges, at den tørvægt, som findes ved udtørring, ikke er absolut, idet en senere gentagelse normalt vil give et andet resultat. Dette skyldes langsomme ændringer i materialets struktur med tiden, f. eks. som følge af hysteresse og omkrystalliseringer. Disse forhold vil blive omtalt for gasbetons vedkommende i kapitel 3.

De fysiske binding kan inddelse i 3 hovedgrupper:

- 1) adsorption
- 2) kapillar kondensation
- 3) osmotisk binding



### 2.2.1. Adsorption

Vandmolekyler vil normalt binde sig til materialeoverflader, da der her virker attraktive og repulsive kræfter samt elektrostatiske kræfter fra vandets dipolmoment. Vandet bindes til materialet i et antal molekylære lag afhængig af, hvilken relativ fugtighed der er i luften over overfladen. Dette ses på fig. 2.1, hvor lagtykkelsen af absorberet vand er afsat i afhængighed af det relative tryk (lig med den relative fugtighed). En nærmere beskrivelse af dette fænomen kan f. eks. findes i SNECK [40], AHLGREN [2] og GREGG & SING [12].

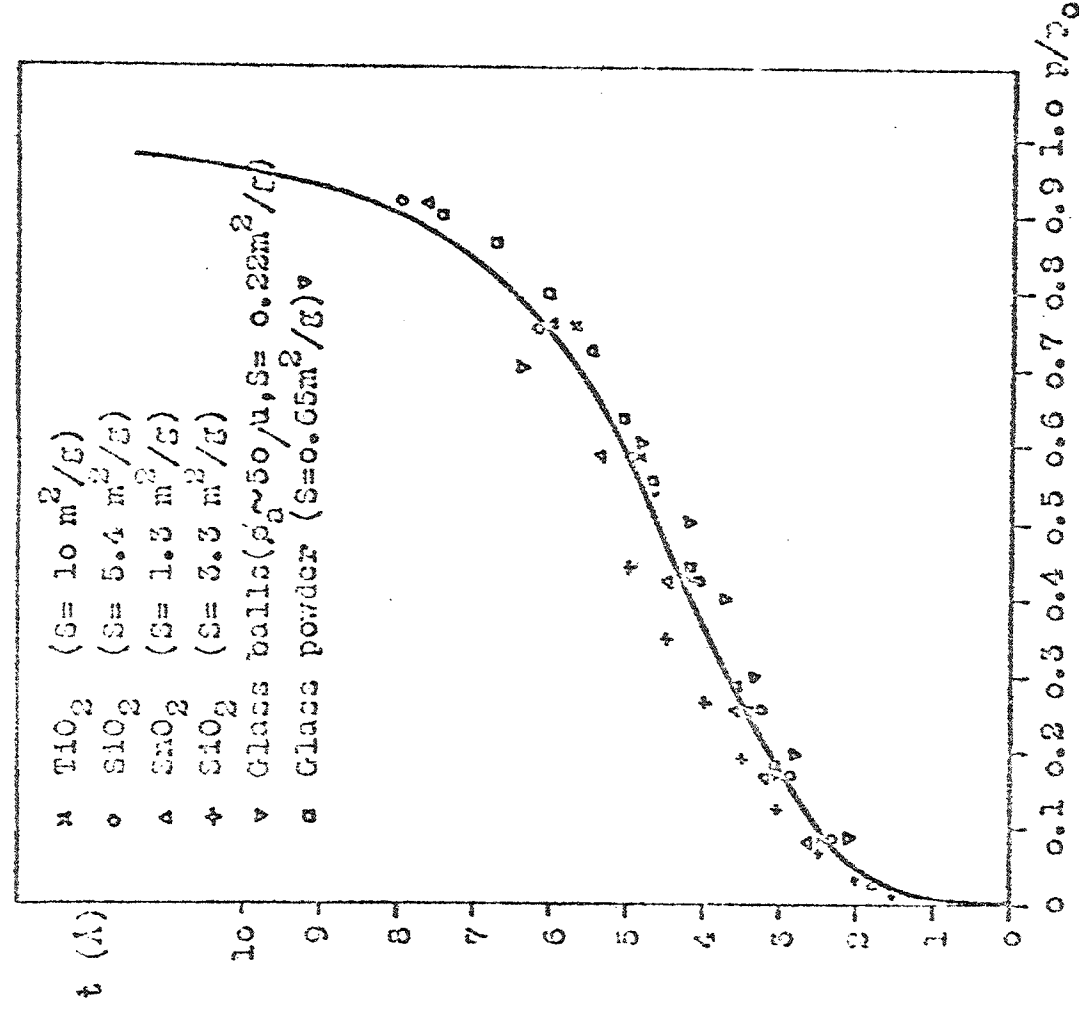


Fig. 2.1. Tykkelsen af adsorberede molekylelag som funktion af det relative tryk. SNECK [40].

Thickness of adsorbed molecule layer as a function of relative pressure. SNECK [40].

Adsorptionen af vandmolekyler sker ikke på den måde, at hvert lag fyldes helt op, før det næste fyldes, men selv ved lav relativ fugtighed findes der et mindre antal vandmolekyler i øvre lag som vist i fig. 2.2, der er beregnet på grundlag af BET-teorien. GREGG & SING [12].

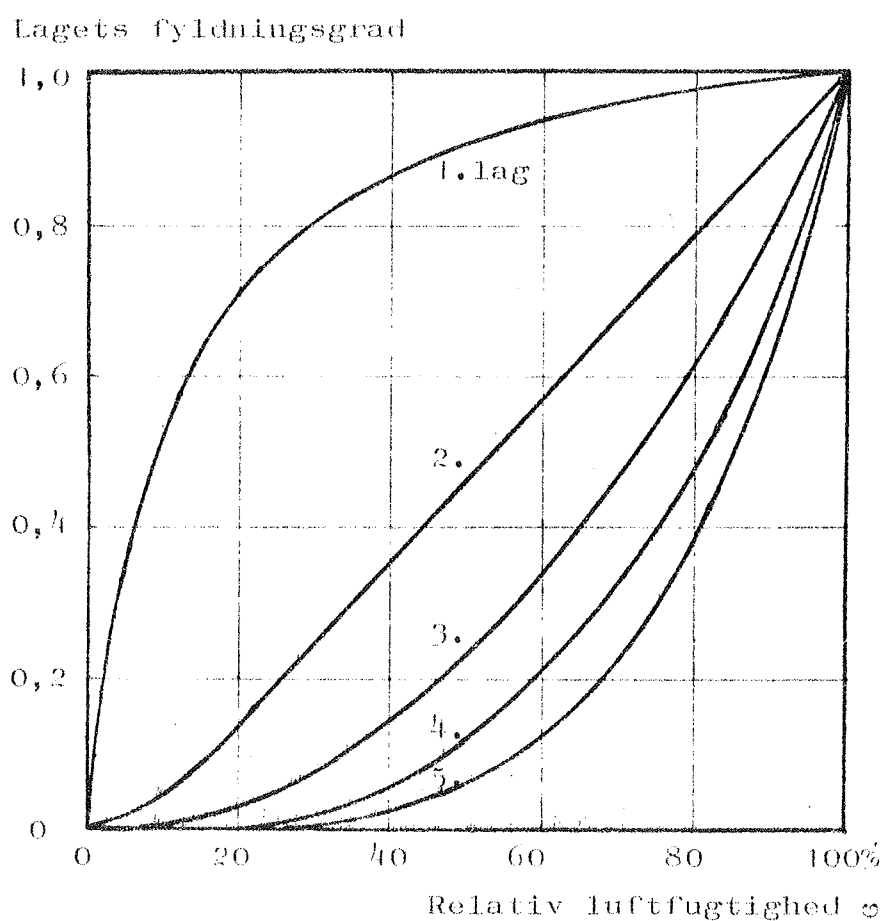


Fig. 2.2. Relativ opbygning af de enkelte lag ved adsorption.

The relative build-up of individual layers by adsorption.

### 2.2.2. Kapillar kondensation

Når den relative fugtighed stiger, og der dannes flere molekylære lag, skabes der efterhånden væskeoverflader, hvor vandet ikke er så fast bundet til materialet som det absorberede vand. Disse væskeoverflader er normalt krumme med en krumning afhængig af den relative fugtighed. Under forudsætning af cylindriske kapillarer fås:

$$P = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

hvor  $P$  er kapillarundertrykket  $[N/m^2]$

$\sigma$  er overfladespændingen  $[N/m]$

$\theta$  er randvinklen

$r$  er porens radius  $[m]$

Damptryksnedsættelsen over en konkav meniskos fås ud fra Thomsons formel (fig. 2.3):

$$p = p' \cdot \exp\left(\frac{-2\sigma}{\rho \cdot r \cdot R \cdot T}\right)$$

hvor  $p$  er damptrykket  $[N/m^2]$

$p'$  er mætningstrykket  $[N/m^2]$

$\sigma$  er overfladespændingen  $[N/m]$

$\rho$  er vandets densitet  $[kg/m^3]$

$r$  er poreradius  $[m]$

$R$  er gaskonstanten for vand  $[J/K \cdot kg]$

$T$  er temperaturen  $[^{\circ}K]$

Denne lovmæssighed har gyldighed for  $r \geq 0,5 \cdot 10^{-9}$  m svarende til vandmolekylets diameter. For  $r \geq 10^{-7}$  m er damptryksnedsættelsen uden betydning.

Formlen angiver, at for en vis relativ fugtighed vil alle kapillarer med en radius, der er mindre end den til den relative fugtighed svarende radius (fra fig. 2.3) være fyldt med vand. Denne lovmæssighed er udledt på grundlag af cylindriske porer, men tilsvarende lovmæssigheder vil findes for andre former for poresystemer.

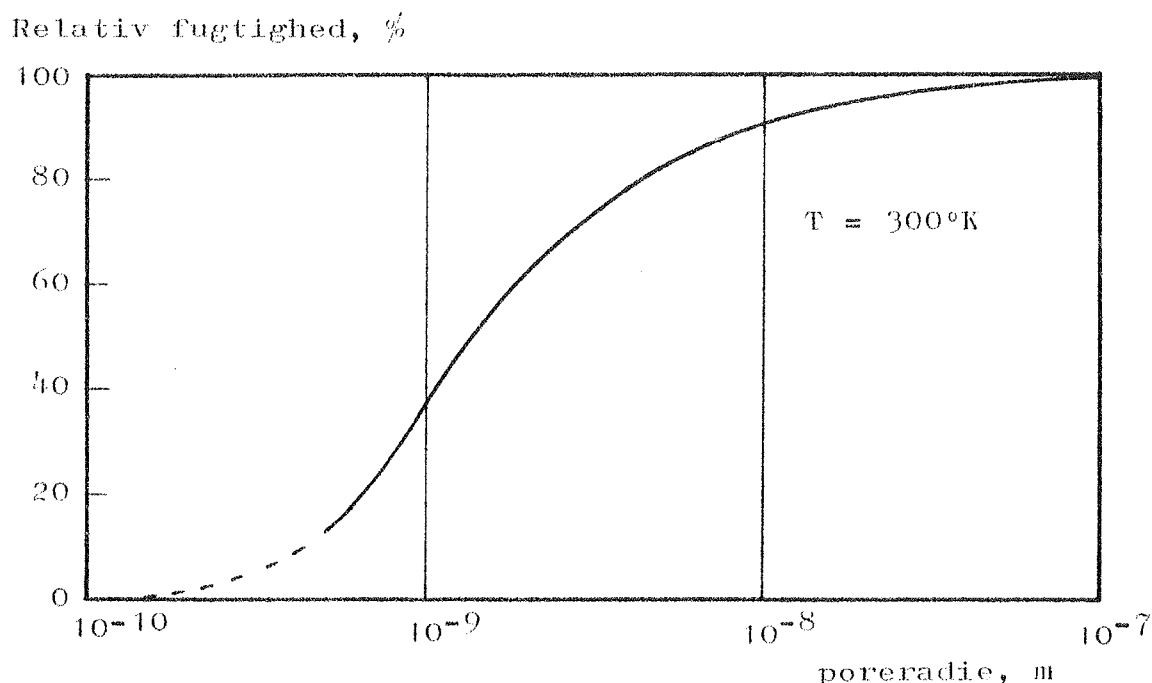


Fig. 2.3. Den relative fugtigheds variation med poreradien efter Thomsons formel.

Relative humidity as a function of pore radius according to Thomson's formulation.

### 2.2.3. Osmotisk binding

Den osmotiske binding af vand skyldes tilstedeværelsen af salte i materialer. Disse salte medfører en nedsættelse af vanddamptrykket i materialet. Saltene findes normalt i små mængder, og da det desuden er næsten umuligt at konstatere, hvor meget der er adsorberet, og hvor meget der er osmotisk bundet, ses der normalt bort fra denne effekt.

### 2.3. Sorptionskurver

Anbringes et materiale i luft med en given relativ fugtighed og temperatur, vil det efter nogen tid opnå et fugtindhold, som er i ligevægt med omgivelserne. Dette ligevægtsfugtindhold er ikke entydigt bestemt, men er afhængigt af, hvilke

fugtvariationer materialet har været underkastet tidligere. Der kan for et materiale findes to grænsekurver, hvorimellem fugtindholdet altid vil ligge. Ved at starte fra et tørt materiale og derefter have den relative fugtighed fås absorptionskurven, og ved at starte med et vandmættet materiale og tørre ud fås desorptionskurven, se fig. 2.4.

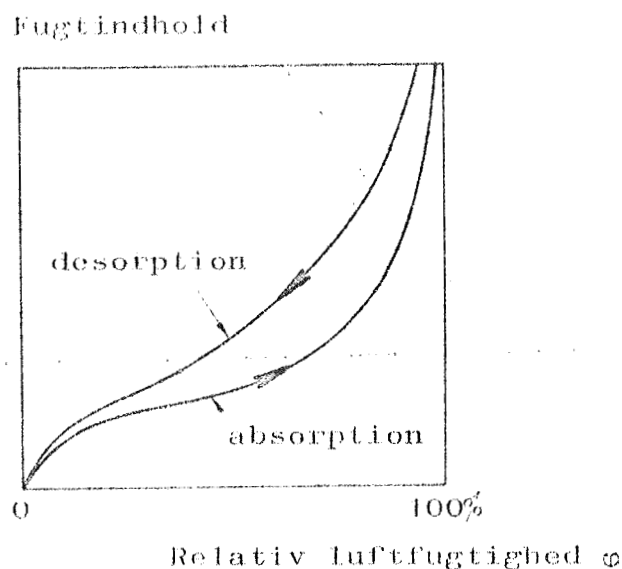


Fig. 2.4. Absorptions- og desorptionskurve.  
Absorption and desorption isotherm.

Af disse to kurver ligger absorptionskurven altid lavest. Forskellen mellem de to kurver er et typisk hysteresefænomen. Denne hystereses størrelse må være afhængig af materialets poreopbygning. Det medfører samtidigt, at har man samme fugtighed i to materialestykker, er det ikke sikkert, den omgivende fugtighed er den samme, og derfor må forsøgseresultaterne ses i lyset af denne kendsgerning.

Temperaturniveauets indflydelse på absorptions- og desorptionskurven er for de fleste uorganiske materialer ikke ret stor (TVEIT [42]). I mange tilfælde er der i stedet for absorptions- og desorptionskurven anvendt en middeldkurve - kaldet sorptionskurven, som bruges ved beregning af forsøgsdata.

For de fleste byggematerialer er sorptionskurven i region S-formet (TVEIT [42], AHLGREN [2]) svarende til fig. 2.5, der viser fugtmekanismernes virkningsområder.

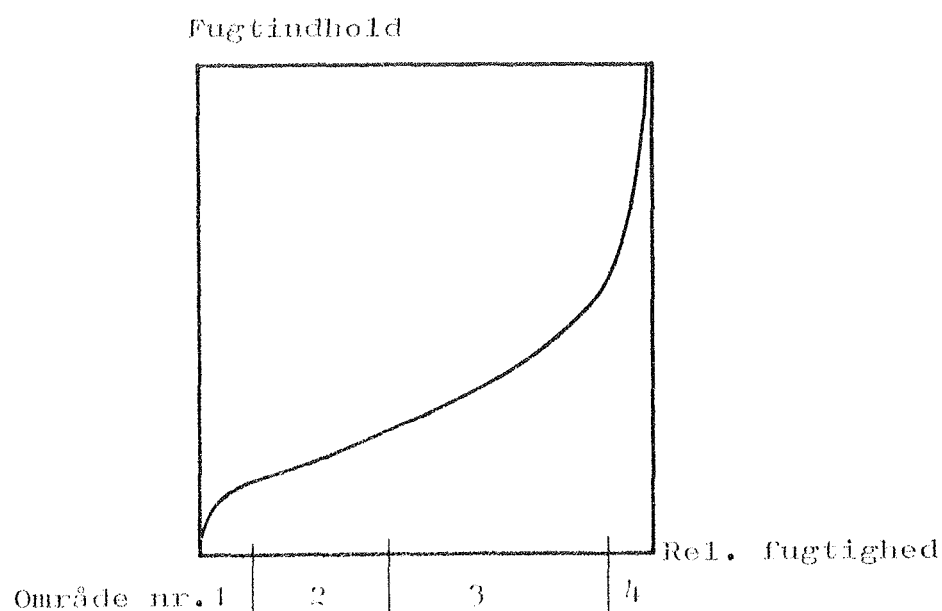


Fig. 2.5. Fugtmekanismernes virkningsområder.

Fields of action for the mechanisms of moisture fixation.

Denne form hænger sammen med bindingskræfterne. Ved lave relative fugtigheder (område 1) adsorberes vandet næsten udelukkende i et monomolekylært lag. I område 2 sker adsorptionen i flere lag, og dette fortsættes også i område 3 og 4. I område 3 begynder kapillarkondensationen at gøre sig gældende, og til slut i område 4 kan også osmotisk binding få betydning. Ved meget høje relative fugtigheder stiger fugtindholdet voldsomt, og man har derfor normalt valgt kun at definere kurven indtil 98% RF (det hygroskopiske fugtindhold). Over denne grænse kan fugtindholdet i stedet relateres til suction-begrebet, se senere.

## 2.4. Fugttransportformer

### 2.4.0. Indledning

Transporten af fugt i materialer er dels afhængig af porestrukturen i materialet, hvorigennem fugten bevæger sig, og dels af, i hvilke faser fugten findes, f. eks. damp- eller væskeform, samt omgivelsernes fugtindhold. Dette medfører, at en rent fysisk beskrivelse for selv meget simple materialer er på det nærmeste umulig. Det ville kræve nøje kendskab til materialets porestruktur at bestemme, hvor meget der transporteres i hver fase. I mange tilfælde må man nøjes med at konstatere, at f. eks. hovedmængden ved lave fugtindhold transporteres som vanddamp, og derfor anvendes de fysiske love, som gælder for damp-transport. Alligevel transporteres en del af fugten som væske eller måske snarere som en serietransport, hvor der sker forvandlinger mellem damp og væske.

Den følgende gennemgang af transportformer er derfor en gennemgang af, hvordan transporten sker i ideale tilfælde, og den bygger især på AHLGREN [3], KRISCHER [21], LUND-HANSEN [25], LYKOW [26] og VOS [45].

#### 2.4.1. Damptransport

Denne transport finder sted, hvis der er forskelle i vanddampkoncentrationer på to sider af et materiale. Transporten er afhængig af, hvilken størrelse kapillarer den foregår igennem. Er kapillarens radius større end vanddampmolekylernes fri middelvejlængde  $10^{-7}$  m, fås diffusion, ellers effusion. Mængden af de to former i en given situation er normalt sådan, at diffusionen er af væsentlig større betydning end effusionen.

Diffusionen af vanddamp i luft er beskrevet ved Fich's lov:

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

hvor  $g$  er fugtstrømmen  $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$

$D$  er vanddamps diffusionskoefficient i luft  $[\text{m}^2/\text{s}]$

$c$  er vanddampkoncentrationen i luft  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Anvendes luftartens tilstandsligning, fås ved isoterme forhold partialtryksgradienten i stedet for vanddampkoncentrationsgradienten, idet  $\frac{dc}{dx} = \frac{1}{RT} \frac{dp}{dx}$ , og deraf fås:

$$g = - \frac{D}{RT} \frac{dp}{dx}$$

hvor  $p$  er vanddamptrykket  $[N/m^2]$

$T$  er temperaturen  $[K]$

$R$  er gaskonstanten  $[J/K \text{ kg}]$

Effusionen af vanddamp gennem en mikrokapillar er angivet ved (LYKOW [27]):

$$g = \frac{8}{3} \cdot \frac{r}{l} \cdot \frac{M}{2\pi R_M T} (p_1 - p_2)$$

hvor  $g$  er fugtstrømmen  $[kg/m^2 s]$

$r$  er mikrokapillarens radius  $[m]$

$l$  er kapillarens længde  $[m]$

$M$  er molekylvægten for vanddamp  $[mol]$

$R_M$  er den almene gaskonstant  $[J/mol K]$

$T$  er temperaturen  $[K]$

$p_1$  og  $p_2$  er damptrykkene på de to sider

For små trykforskelle og korte kapillarer kan formelen omskrives til:

$$g = - \frac{8}{3} \cdot r \cdot \frac{M}{2\pi R_M T} \frac{dp}{dx}$$

I overgangsområdet mellem disse to transportformer findes den såkaldte "slip-flow" (RADJY [34]).

Hvis man kender poresystemet, kan man nu beregne transporten fra hver af disse bidrag og få en totaltransport. Dette er dog så kompliceret, at man såvidt vides aldrig har forsøgt det for et byggemateriale. I stedet har man valgt at måle transportkoefficienterne i en total transport, hvor enten vanddamptrykket eller vanddampkoncentrationen er potentialer.



Herved fås for porøse materialer lovene:

$$g = - \delta_c \frac{dc}{dx}$$

$$g = - \delta_p \frac{dp}{dx}$$

hvor  $\delta_c$  [ $m^2/s$ ] og  $\delta_p$  [ $s$ ] er diffusionstal for henholdsvis koncentrationspotential og damptrykspotential.

De to diffusionstal er afhængige af materialets poresystem, samt ved hvilket fugtniveau og temperaturniveau transporten sker.

#### 2.4.2. Væsketransport

På grund af adsorption dannes væskelag på alle materialeoverflader med en tykkelse, der er afhængig af den relative fugtighed. Heri kan der ske væsketransport som overfladekrybning. Ved højere relative fugtigheder sker der kapillarkondensation, hvorved der dannes væskefyldte afsnit af materialet.

For fugttransport i væskefyldte porer gælder Darcy's lov:

$$g = - k_w \frac{dw}{dx}$$

hvor  $k_w$  er transportkoefficienten [ $m^2/s$ ]

Potentialet  $w$  [ $J/kg$ ] består af 2 dele:

$$w = w_k + w_g$$

hvor  $w_k$  er kapillarpotentialet:

$$w_k = \frac{P_k}{\rho} = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho r}$$

og  $w_g$  er tyngdepotentialet:

$$w_g = g_T h$$

$p_k$  er kapillarundertrykket  $[N/m^2]$   
 $\rho$  er vands densitet  $[kg/m^3]$   
 $\sigma$  er overfladespændingen  $[N/m]$   
 $\theta$  er randvinklen  
 $r$  er kapillarradien  $[m]$   
 $g_T$  er tyngdeaccelerationen  
 $h$  er sugehøjden  $[m]$

Ved at sætte  $k_w \frac{dw}{d\psi} = D \cdot \rho$  fås:

$$g = - D \rho \frac{d\psi}{dx} = - D \rho \text{ grad } \psi$$

hvor  $D$  er kapillarledningstallet  $[m^2/s]$   
 $\psi$  er fugtindholdet  $[m^3/m^3]$

Denne form for transport svarer til Poiseuille-strømning i rør. Det er givet, at væsketransporten er meget afhængig af, hvor store sammenhængende væskeområder der findes i materialet. Væsketransporten kan være meget længe om at nå en stationær tilstand, bl.a. ved opslugningsforsøg går det meget langsomt over et vist fugtniveau. Dette skyldes, at samtidig med at vandet skal ind, skal den indesluttete luft ud, og det kan kun ske ved opløsning af luften i vand (en langsom proces),

For overfladekrybningen gælder, at den er meget vanskelig at måle, men man ved fra forsøg ved lave fugtindhold, at den kan have væsentlig betydning (RADJY [34]). Transporten sker her som følge af bindingen mellem materiale og vandmolekyler. Bindingens styrke vil svinge, og dermed kan molekylerne flytte sig langs overfladerne. Denne form for transport vil også medføre, at transportformen i helt væskefyldte kapillarer ikke vil være ren Poiseuille-strømning, men da enhver overflade har absorberet molekyler, en form for "slip flow". Alligevel anvendes formelen:

$$g = - D \rho \text{ grad } \psi$$

for væsketransport.

### 2.4.3. Temperaturafhængig transport

Den temperaturafhængige transport skyldes, at flere forskellige fysiske størrelser er temperaturafhængige.

#### 1) Vanddamptransport

Effusion finder sted, hvis der er en temperaturforskel over materialet. Der vil desuden ske en form for termodiffusion, hvor de tunge molekyler vil bevæge sig mod lavere temperatur.

#### 2) Væsketransport

Da overfladespændingen afhænger af temperaturen, vil der ske en transport i væskefyldte kapillarer. For overfladekrybningen gælder, at bindingen mellem molekyler og overflader vil ændre sig i afhængighed af temperaturen (GREGG [12]).

Alt i alt må man til slut regne med, at selv om disse strømninger til dels går i forskellig retning, vil den resulterende transport ikke være nul. Til at beskrive den totale temperaturafhængige transport bruges normalt udtrykket:

$$g = - K \cdot \text{grad } T$$

hvor  $K$  er et termodiffusionstal  $[\text{kg/m s K}]$ , som må bestemmes ved forsøg.

### 2.4.4. Totaltrykafhængig transport

Hvis et materiale ikke er lufttæt, hvilket det ikke kan være, hvis der sker diffusion gennem det, vil der blive transporteret luft gennem materialet, hvis der er en trykforskel over det. Denne luft vil også indeholde vanddamp. Desuden vil en trykgradient over materialet kunne medføre, at fugtfordelingen i materialets porer ændres og dermed den totale fugttransport. Til at beskrive den totaltrykafhængige transport bruges normalt udtrykket:

$$g = - f \cdot \text{grad } P$$

hvor  $f$  er transportkoefficienten  $[\text{m kg/N s}]$

$P$  er totaltrykket  $[\text{N/m}^2]$

For løsning af problemer med samtidig luftstrømning og diffusion kan henvises til SANDBERG [36].

#### 2.4.5. Andre transportformer

Disse transportformer er normalt af ringe betydning og nævnes derfor kun som muligheder:

- 1) Ved bindingen til materialet er saltindholdet af betydning, og derfor vil forskelle i saltindhold medføre fugttransport. Dette sker som følge af osmotiske trykforskelle.
- 2) Det er desuden muligt, at elektriske potentialer kan påvirke transporten.

### 2.5. Transportligninger

#### 2.5.0. Indledning

I de følgende afsnit angives en række ligningssystemer for transport af fugt i materialer. Der indledes med det mest komplette system og sluttet med det simpleste (afsnit 2.5.3). Disse simple ligninger er i øjeblikket de eneste, der bruges til praktiske beregninger. Det må bemærkes, at man ved disse ligninger ikke tager stilling til, hvordan fugten fysisk transporteres, men kun til, hvilke potentialer der giver anledning til transport. D.v.s. at et diffusionstal også indeholder bidrag fra væsketransporten i materialet.

#### 2.5.1. 3 ligninger med 3 potentialer

I et porøst materiale vil man kunne opstille 3 transportligninger for fugt-, varme- og lufttransport (CLAESSON [8], LYKOW [27]). Denne meget generelle opstilling må for øjeblikket betegnes som ret teoretisk, da transportkoefficienternes værdi er næsten ukendt.

De 3 ligninger er:

Fugttransport:

$$J_{\psi} = - \lambda_{\psi\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \lambda_{\psi T} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{\psi P} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Lufttransport:

$$J_a = - \lambda_{a\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \lambda_{aT} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{aP} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Energi transport:

$$J_e = - \lambda_{e\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \lambda_{eT} \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda_{eP} \frac{\partial P}{\partial x}$$

hvor  $\psi$  er fugtindholdet  $[m^3/m^3]$

$T$  er temperaturen  $[K]$

$P$  er totaltrykket  $[N/m^2]$

$J$  er transporterede mængder

$\lambda$  er transportkoefficienter

Alle koefficienterne  $\lambda$  er afhængige af  $\psi$ ,  $T$  og  $P$ .

Denne opstilling af et ligningssystem er et udtryk for, hvilke kendte potentialer transportfænomenerne afhænger af og må betegnes som et fænomenologisk ligningssystem.

### 2.5.2. 2 ligninger med 2 potentialer

I langt de fleste tilfælde vil udførte forsøg være isobare, d.v.s. der kan ses bort fra trykleddene. Herved reduceres det tidligere ligningssystem til:

Fugttransport:

$$J_{\psi} = - \lambda_{\psi\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \lambda_{\psi T} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Varmetransport (energi):

$$J_e = - \lambda_{e\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \lambda_{eT} \frac{\partial T}{\partial x}$$

Eller med mere almindelige betegnelser:

Fugt:  $g = - D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi - K \cdot \text{grad } T$

Varme:  $q = - \lambda_{e\psi} \text{ grad } \psi - \lambda \cdot \text{grad } T$

For varmetransportens vedkommende indregnes normalt første led i varmeledningstallet ( $\lambda$ -værdien), d.v.s.

$$\lambda = \lambda(\psi, \frac{\partial \psi}{\partial x}, T)$$

$$q = - \lambda \text{ grad } T$$

Der er ikke noget i vejen for at anvende sådanne 2 sammenhørende ligninger, men det største forsøgstekniske problem er uden tvivl bestemmelsen af varmetransporten.

### 2.5.3. Enkelt ligning

På grund af besværet med samtidigt at måle fugt og varme, og fordi man skønner, at indflydelsen af den transporterede varmemængde på fugtligninger er ringe, har man valgt til beskrivelsen af fugttransporten at anvende ligningen:

$$g = - D \cdot \rho \text{ grad } \psi - K \text{ grad } T$$

Eller under isoterme forhold:

$$g = - D \cdot \rho \text{ grad } \psi$$

Nu er denne ligning for fugttransporten kun valgt som et eksempel, principielt kunne man lige så godt anvende andre ligningssystemer, f.eks.:

$$g = - \delta_p \text{ grad } p - K \text{ grad } T$$

$$g = - \delta_p \text{ grad } p - D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi$$

I NICOLAJSSEN [28] findes formler for omregning af transportkoefficienterne fra et ligningssystem til et andet.

Den mest anvendte ligning er uden tvivl den isoterme ligning:

$$q_m = - \delta_p \text{ grad } p$$

Der er desuden muligheden for at vælge koncentrationen  $c$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] i stedet for damptrykket  $p$ . For fugtindholdspotentialet gælder noget lignende, idet man kan anvende fugtindholdet  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] eller  $x$  [ $\text{kg}/\text{kg}$ ] i stedet for  $\psi$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ].

#### 2.5.4. Alternativ beskrivelse (suction)

Ved anvendelse af den relative fugtighed i f.eks. sorptionskurver fås en meget stejl stigning ved 98-100%. For at opnå en skala, hvor værdierne mellem 0 og 100% RF kan behandles indføres et trykpotential (suction)  $[N/m^2]$  i stedet for den relative fugtighed:

$$p_{\text{suction}} = - \rho \cdot RT \cdot \ln \phi$$

Dette er en ligning af samme form som Thomsons lov for kapillarkondensation.

Behandles transportfænomener, er ligningen:

$$g = - \delta_{\text{suc}} \cdot \text{grad } p_{\text{suc}}$$

hvor  $\delta$  er transportkoefficienten  $[kg \cdot m / N \cdot s]$

Denne ligning gælder for samtlige relative fugtigheder mellem 0 og 100%. Ved denne metode er det måske muligt at opnå en enklere totalbeskrivelse af transporten. De tidligere omtalte ligninger, f.eks.  $g = -\delta \cdot \text{grad } p$ , lider af den ulempe, at kommer prøvelegemet over ca. 98% RF, så er en ganske lille ændring i grad  $p$  meget afgørende for den totale transport, derfor bruges den kun under 98% RF. For  $g = -D \cdot \rho \cdot \text{grad } \phi$  gælder, at der her opstår problemer, hvis sorptionskurven er meget flad, så små ændringer i grad  $\phi$  kan blive afgørende, derfor bruges denne ligning normalt kun over 98% RF.

Disse problemer overvinder suction beskrivelsen let, idet beskrivelsen kan anvendes fra helt tørt til totalt vandmættet materiale. En omfattende beskrivelse af begrebet findes i BOMBERG [6], hvor der også findes en omfattende litteraturliste.

For varmetransportens vedkommende indregnes normalt første led i varmeledningstallet ( $\lambda$ -værdien), d.v.s.

$$\lambda = \lambda(\psi, \frac{\partial \psi}{\partial x}, T)$$

$$q = - \lambda \text{ grad } T$$

Der er ikke noget i vejen for at anvende sådanne 2 sammenhørende ligninger, men det største forsøgstekniske problem er uden tvivl bestemmelsen af varmetransporten.

### 2.5.3. Enkelt ligning

På grund af besværet med samtidigt at måle fugt og varme, og fordi man skønner, at indflydelsen af den transporterede varmemængde på fugtligninger er ringe, har man valgt til beskrivelsen af fugttransporten at anvende ligningen:

$$g = - D \cdot p \text{ grad } \psi - K \text{ grad } T$$

Eletr under isoterme forhold:

$$g = - D \cdot p \text{ grad } \psi$$

Nu er denne ligning for fugttransporten kun valgt som et eksempel, principielt kunne man lige så godt anvende andre ligningssystemer, f.eks.:

$$g = - \delta_p \text{ grad } p - K \text{ grad } T$$

$$g = - \delta_p \text{ grad } p - D \cdot p \cdot \text{grad } \psi$$

I NICOLAJSEN [28] findes formler for omregning af transportkoefficienterne fra et ligningssystem til et andet.

Den mest anvendte ligning er uden tvivl den isoterme ligning:

$$q_m = - \delta_p \text{ grad } p$$

Der er desuden muligheden for at vælge koncentrationen  $c$   $[\text{kg}/\text{m}^3]$  i stedet for damptrykket  $p$ . For fugtindholdspotentialet gælder noget lignende, idet man kan anvende fugtindholdet  $w$   $[\text{kg}/\text{m}^3]$  eller  $x$   $[\text{kg}/\text{kg}]$  i stedet for  $\psi$   $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ .



#### 2.5.4. Alternativ beskrivelse (suction)

Ved anvendelse af den relative fugtighed i f.eks. sorptionskurver fås en meget stejl stigning ved 98-100%. For at opnå en skala, hvor værdierne mellem 0 og 100% RF kan behandles indføres et trykpotential (suction)  $[N/m^2]$  i stedet for den relative fugtighed:

$$p_{\text{suction}} = - p \cdot RT \cdot \ln \varphi$$

Dette er en ligning af samme form som Thomsons lov for kapillarkondensation.

Behandles transportfænomener, er ligningen:

$$g = - \delta_{\text{suc}} \cdot \text{grad } p_{\text{suc}}$$

hvor  $\delta$  er transportkoefficienten  $[kg \cdot m / N \cdot s]$

Denne ligning gælder for samtlige relative fugtigheder mellem 0 og 100%. Ved denne metode er det måske muligt at opnå en enklere totalbeskrivelse af transporten. De tidligere omtalte ligninger, f.eks.  $g = -\delta \cdot \text{grad } p$ , lider af den ulempe, at kommer prøvelegemet over ca. 98% RF, så er en ganske lille ændring i grad  $p$  meget afgørende for den totale transport, derfor bruges den kun under 98% RF. For  $g = -D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi$  gælder, at der her opstår problemer, hvis sorptionskurven er meget flad, så små ændringer i grad  $\psi$  kan blive afgørende, derfor bruges denne ligning normalt kun over 98% RF.

Disse problemer overvinder suction beskrivelsen let, idet beskrivelsen kan anvendes fra helt tørt til totalt vandmættet materiale. En omfattende beskrivelse af begrebet findes i BOMBERG [6], hvor der også findes en omfattende litteraturliste.

### 3. MATERIALET

#### 3.0. Indledning

Valget af gasbeton som forsøgsmateriale skyldes, at fugttransporten gennem gasbeton går ret hurtigt. Hvor der f.eks. ved beton må ventes i flere år på ligevægt, vil gasbeton opnå ligevægt på nogle måneder. Rent forsøgsteknisk vil sådanne langvarige forsøg som ved beton være vanskelige at arbejde med. Gasbeton har desuden den fordel, at materialet på grund af, at det har været autoklaveret, kun i meget ringe grad ændrer sig med tiden. Desuden er det væsentligt, at materialet har både store og små porer, hvorved både diffusion og væsketransport får betydning. Ved f.eks. skumplast er fugttransporten nærmest en ren diffusion, idet der ikke findes et sammenhængende poresystem.

Det er også afgørende, at gasbeton er et meget anvendt byggemateriale med en forholdsvis ensartet struktur, så de forsøgsmæssige resultater forholdsvis enkelt kan overføres på virkelige bygningskonstruktioner.

#### 3.1. Fremstilling og struktur

Gasbeton fremstilles af Portlandcement, brændt kalk, kvartssand, flyveaske og vand. Disse blandes i et passende forhold, og der tilsættes en vis mængde aluminiumpulver samt visse katalysatorer. Pulveret og kalciumhydroxid går i forbindelse med hinanden og får massen til at hæve til ca. det dobbelte volumen, idet der dannes brint. Herved opnås den lave rumvægt, som bestemmes af mængden af aluminiumpulver. Efter denne hævningsproces hardner massen, som derefter skæres ud i blokke.

Efter udskæringen bliver blokkene damphærdede (autoklaveret) ved ca. 10 atm. og ca. 180°C i 10-20 timer. Under denne hærdningsproces sker der en krystallisation af hydratiserede kalciumsilikater.

Efter autoklaveringen er gasbetonen færdig, og der sker kun små ændringer, bl.a. er nogle af kalciumsilikaterne metastabile, og de vil derfor søge at omkrystallisere sig, når der er vand til stede. Men i forhold til andre cementbundne materialer er det volumenstabilt og har stor relativ styrke. Gasbetonen indeholder efter autoklaveringen et overskud af vand (byggefugt), som afgives til omgivelserne efterhånden.

Betragtes overfladen af et stykke gasbeton, vil man bemærke en mængde nærmest kugleformede huller med en størrelse på 1-5 mm i diameter. Det er disse huller, som dannes af brinten, når den udvikles. Imellem disse store porer findes det faste materiale, der består af kalciumsilikatforbindelser. Anbringer man et stykke gasbeton i et scanning-elektron-mikroskop, kan man få billeder [29], som viser en veludviklet, krystallinsk struktur med meget klare, lige plade- og nåleformede krystaller. Der findes også periklindannelser, d.v.s. krystallerne vokser i bestemte vinkler i forhold til hinanden. Krystallernes størrelse er længde-bredde 1-5  $\mu\text{m}$ , tykkelse 0,1 - 0,3  $\mu\text{m}$ .

### 3.2. Prøvelegemer

Efter at gasbeton var valgt som materiale, måtte det bestemmes, hvilke dimensioner prøvelegemerne skulle have. Det blev valgt at anvende cylindriske prøvelegemer, da hygro-termiske randfænomener ved forsøgene er mindre og tildannelsen lettere. Diameteren på prøvelegemet blev valgt til ca. 121 mm, idet der blev taget hensyn til måle-metoden for fugtindholdet (gammastrålingstransmissions-målinger). Disse overvejelser vil blive nærmere omtalt i afsnit 4. Tykkelsen af prøvelegemerne blev valgt til ca. 50 mm, da større tykkelse ville betyde mere langvarige forsøg, og mindre tykkelse kunne medføre, at det ville være vanskeligt at måle temperaturer og fugtindhold med en rimelig nøjagtighed.

Prøvelegemerne er dels savet dels drejet ud af en række gasbetonblokke, som er nogenlunde ensartede. Der er af H+H Gasbeton fremstillet 70 cylindriske prøvelegemer,

hvoraf ca. 35 indtil nu er anvendt. De resterende prøvelegemer er dels i reserve, hvis der senere skulle blive brug for flere til nye forsøg, dels er nogle af dem kasseret, fordi der er revner i gasbetonen, eller fordi de er for inhomogene.

Prøvernes højde og diameter blev efter fremstillingen målt, og derefter blev de stillet til udtørring i et varmeskab ved 105°C. Herved blev tørvægten bestemt, og rumvægten for de tørre prøvelegemer kunne bestemmes.

De målte værdier er:

	middel	standard afvigelse	max.	min.
diameter mm	121,16	0,51	121,48	120,08
højde mm	50,30	0,08	50,55	50,04
tør rum- vægt kg/m <sup>3</sup>	572,6	10,6	597,5	557,1

Det fremgår heraf, at tørrumvægten har en ret stor spredning, og det kunne derfor tænkes, at de enkelte prøvelegemer også havde en stor indre variation i rumvægten. Dette blev undersøgt i gammatransmissionsmåleudstyret [30], hvor strålingsintensiteten blev målt i 6 forskellige vinkler (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° fra en afmærket linie) og for hver af disse i 5 højder (5, 15, 25, 35, 45 mm fra prøvelegemets nedre kant til centret af strålen). Herved opnåedes 30 målinger for hvert prøvelegeme, som kunne give et mål for variationerne i tørrumvægten, idet strålingsintensitet og rumvægt er sammenhørende. På fig. 3.1. ses et eksempel på en sådan måling.

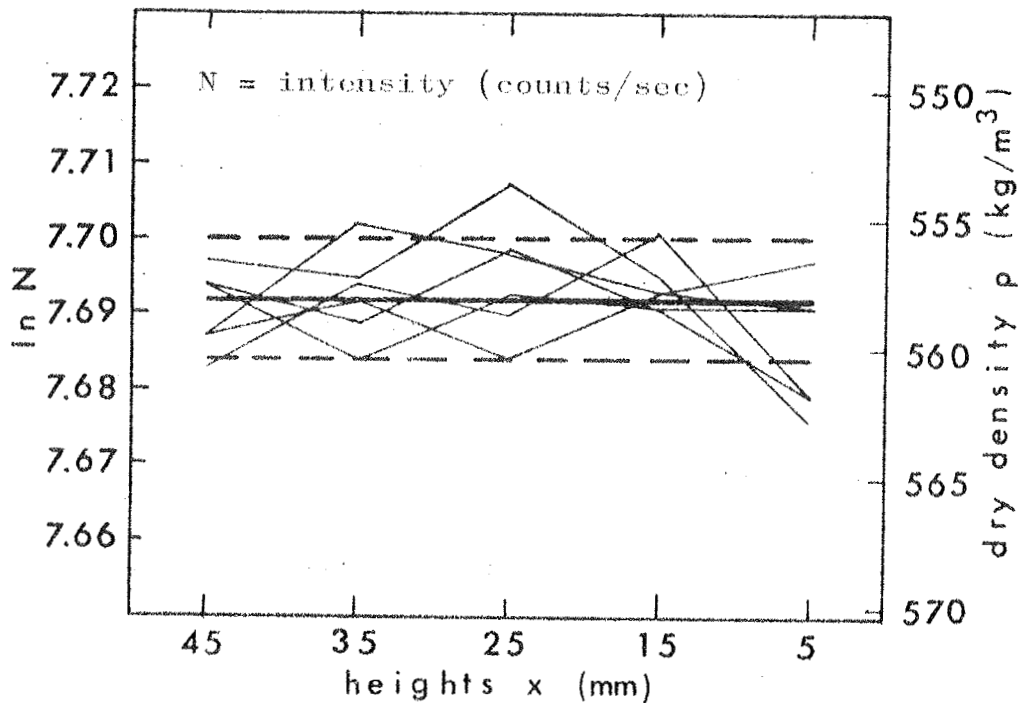


Fig. 3.1. Variationen af den naturlige logaritme for et prøvelegeme. De ækvivalente rumvægtsvariationer er også vist samt middelværdien og standardafvigelsen.

The variation of the natural logarithm for one specimen. The equivalent density-variations are also shown, and the mean value and the limits of standard derivation.

I dette tilfælde er middelumvægten  $\rho$  558  $\text{kg/m}^3$ . Den viste spredning må betegnes som meget ringe, når man sammenligner med spredningen på middelumvægten mellem prøverne. For samtlige prøvelegemer fås:

	middel	max.	min.
standardafvigelsen på rumvægten $\sigma(\rho)$	3,41 $\text{kg/m}^3$	7,93 $\text{kg/m}^3$	1,61 $\text{kg/m}^3$
$\sigma(\rho)$ for den enkelte $\gamma$ -måling	0,56 $\text{kg/m}^3$		

Heraf fremgår det, at variationerne i rumvægt er væsentlig større end variationerne på de enkelte  $\gamma$ -målinger, d.v.s. at det er inhomogeniteter, der måles. Sammenlignes rumvægtsvariationerne prøverne imellem med variationerne inden for det enkelte prøvelegeme, ses det, at

prøvelegemerne har små, indre variationer. For at undgå for store inhomogeniteter blev alle prøvelegemer, hvis standardafvigelse på rumvægten var større end  $5 \text{ kg/m}^3$ , sorteret fra.

Prøverne blev efter at være taget ud af varmeskabet pålimet en 5-lags folie med et aluminiumslag, så diffusionsmodstanden blev meget stor (fig. 3.2.). Som lim blev brugt Araldit (AW116) med hærder (HV953U). Folien blev limet omkring cylinderfladen og den ene endeflade.

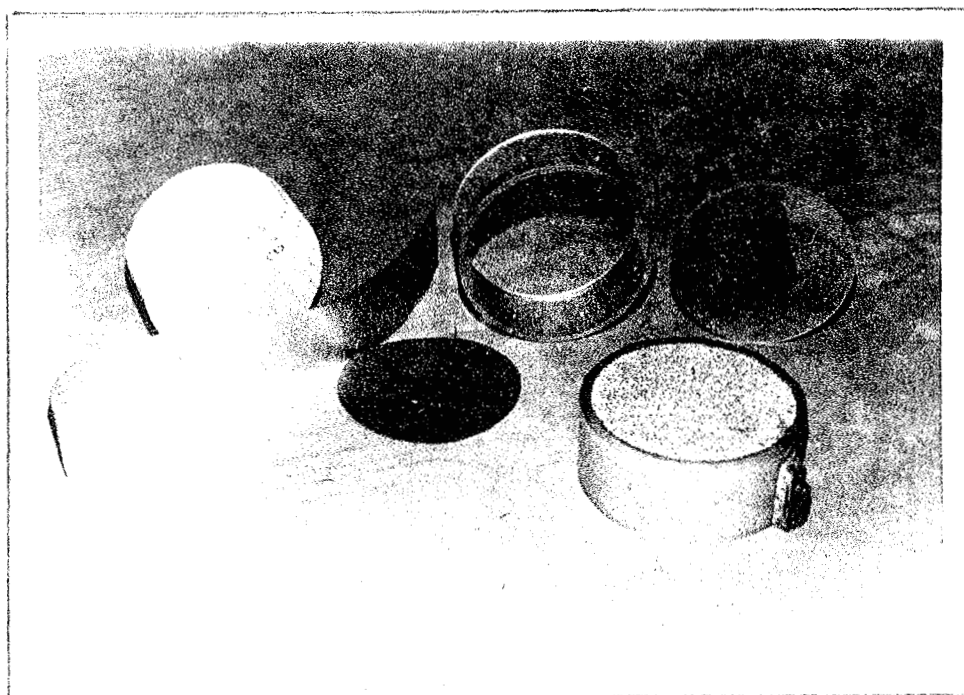


Fig. 3.2. I forgrunden til højre færdigmonteret prøvelegeme. Bagved fra venstre mod højre prøvelegeme, 2 stk. 5-lags folie, plexiglasring og plexiglasplade.

In the front to the right assembled specimen. Behind from the left to the right specimen, 2 pieces of 5-layers foil with Al, acrylring and acrylplate.

For at gøre prøvelegemerne mere mekanisk stabile og lettere at fastgøre blev prøvelegemet med folien limet fast i en plexiglasring med ydre diameter 133 mm og tykkelse 5 mm. Til slut limes en plade oven på den med folie

lukkede endeflade, og derefter blev, efter at limen havde hårdet, denne plade drejet plan. De prøvelegemer, der skulle bruges til tagkondensforsøgene, blev derefter forsynet med kobber-konstantan termoelementer, så temperaturfordelingen under forsøget kunne følges. Termoelementerne blev limet i borede 1 mm huller og tilsluttet et stik på prøvelegemet, så forbindelsen kan afbrydes, når prøvelegemet tages ud af opstillingen af hensyn til vejning og måling. De 5 termoelementer er anbragt, så det første er 5 mm fra den åbne gasbetonendeflade og derefter med 11 mm's afstand mellem hver.

Efter at prøvelegemerne var færdigmonterede, blev de vejret og svækkelsen af gammastrålingen på de steder, hvor man senere vil måle fugtindholdet, bestemt. Ved vejningen fik man bestemt tørvægten incl. lim, plexiglas, stik og termoelementer. Denne bestemmelse er behæftet med en vis usikkerhed, da den tørre gasbeton har nået at optage en mindre mængde fugt, men det har ingen væsentlig indflydelse på resultaterne af forsøgene.

### 3.3. Sorptionskurven

Ved brug af små provestykker (5.5.2 cm) og de klimaskabe, som også anvendes ved udtørningsforsøgene, har laboratoriet forsøgt at danne sig et begreb om sorptionskurvens udseende (fig. 3.3). Med prøvelegemer af denne størrelse tager det 1-2 mdr., inden fugtligevægt indtræder. Forsøgene har ikke været ren absorption eller desorption på grund af fejl i kølingen til klimakasserne. Herved fremkommer der en stor spredning på resultaterne, som det også fremgår af figuren. På samme figur er indtegnet en måling af AHLGREN [2] på svensk gasbeton, hvor både absorptions- og desorptionsisotermen er fundet.

Da vore målinger udviser så stor spredning, er der ved Lunds tekniske Højskole blevet udført en måling med det af AHLGREN udviklede udstyr på en prøve på ca. 1 cm<sup>3</sup>. Denne måling har hidtil givet ligevægtsfugtindholdet ved 98% RF til 15,8% vægt ved absorption og 30,8% vægt ved desorption.

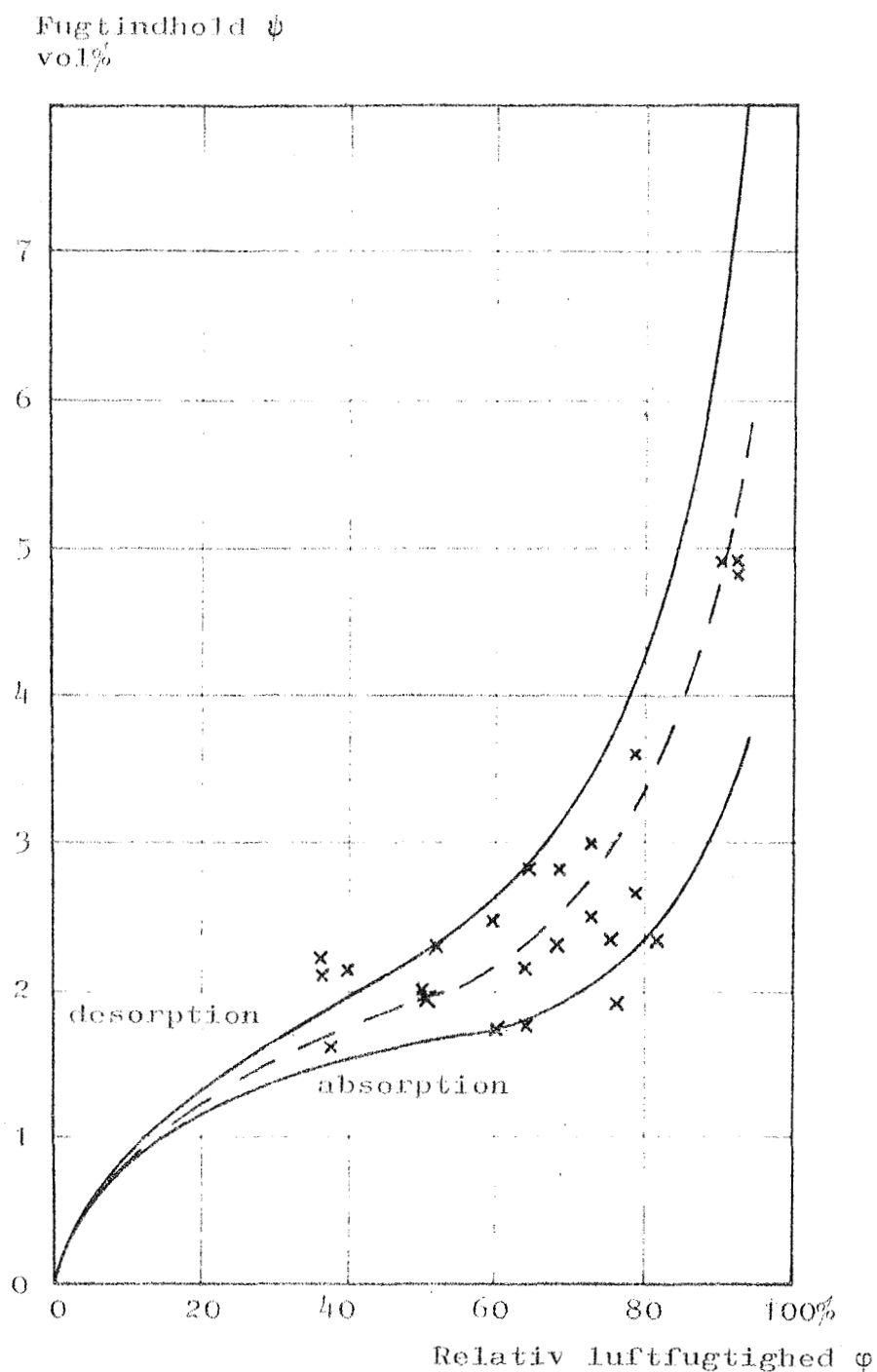


Fig. 3.3. Absorptions- og desorptionskurve efter AHLGREN [2] for gasbeton med  $\rho=510 \text{ kg/m}^3$  samt målinger (x) på benyttet gasbeton med  $\rho=566 \text{ kg/m}^3$  og dimensionerne  $5 \cdot 5 \cdot 2 \text{ cm}$ .

Absorption and desorption isotherms for cellular concrete with  $\rho=510 \text{ kg/m}^3$  and measurements (x) on the used cellular concrete with  $\rho=566 \text{ kg/m}^3$  and dimensions  $5 \cdot 5 \cdot 2 \text{ cm}$ .



Da Laboratoriet for Bygningsmaterialer (Dth) i 1973 har fået færdigbygget et udstyr til bestemmelse af absorptions- og desorptionskurver, er der blevet målt på en pulveriseret prøve (vægt ca. 0,15 g). Resultatet fremgår af fig. 3.4. Apparaturet til bestemmelsen består af et lukket rørsystem, hvori der kan skabes konstant vand-damptryk. I dette system findes en kvartsfjedervægt, hvorpå prøven anbringes. Ved måling af kvartsfjederens forlængelse og damptrykket kan sorptionskurven bestemmes. Metoden er hurtig, ca. 6 dogn for denne kurve.

Ud fra BET-teorien (AHLGREN [2], GREGG [12]) er på grundlag af absorptionskurvens nederste del beregnet materialets specifikke areal  $S = 76 \text{ m}^2/\text{g}$ . Arealets størrelse stemmer med svensk gasbeton, der giver  $S = 89 \text{ m}^2/\text{g}$ . Dette areals størrelse giver et ganske godt indtryk af, at materialets indre overflade er stor. Ud fra materialets desorptions-isoterm er det muligt at beregne porefordelingen under visse forudsætninger.

Ved brug af suction-beskrivelsen (BOMBERG [6]) kan sorptionskurven omregnes til en suctionskurve. Dette er ikke gjort, da der mangler suction-værdier for højere fugtindhold. En bestemmelse af suction-kurven (fig. 3.5) for svensk gasbeton udviser et for de i afhandlingen udførte forsøg interessant punkt. Forskellen mellem absorptions- og desorptionskurven angiver hysteresen, som ved fugtindholdet ca.  $300 \text{ kg/m}^3$  har et minimum.

Dette kan forklare nogle af de resultater, som udtørnings-forsøgene giver.

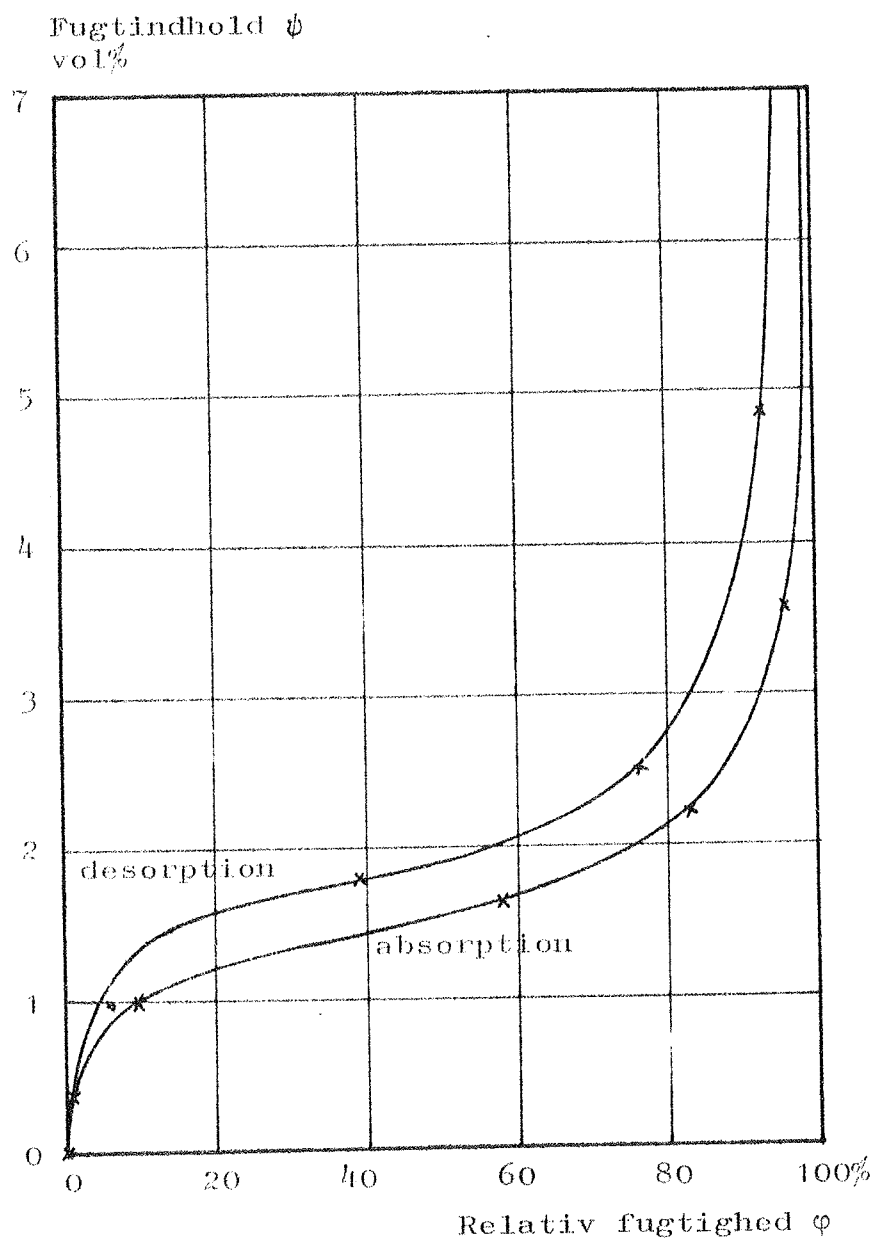


Fig. 3.4. Absorptions- og desorptionskurve for benyttet gasbeton ( $\rho=550 \text{ kg/m}^3$ ) målt ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Dth.

Absorption and desorption isotherm for the used cellular concrete ( $\rho=550 \text{ kg/m}^3$ ) measured at the Building Materials Laboratory, Dth.

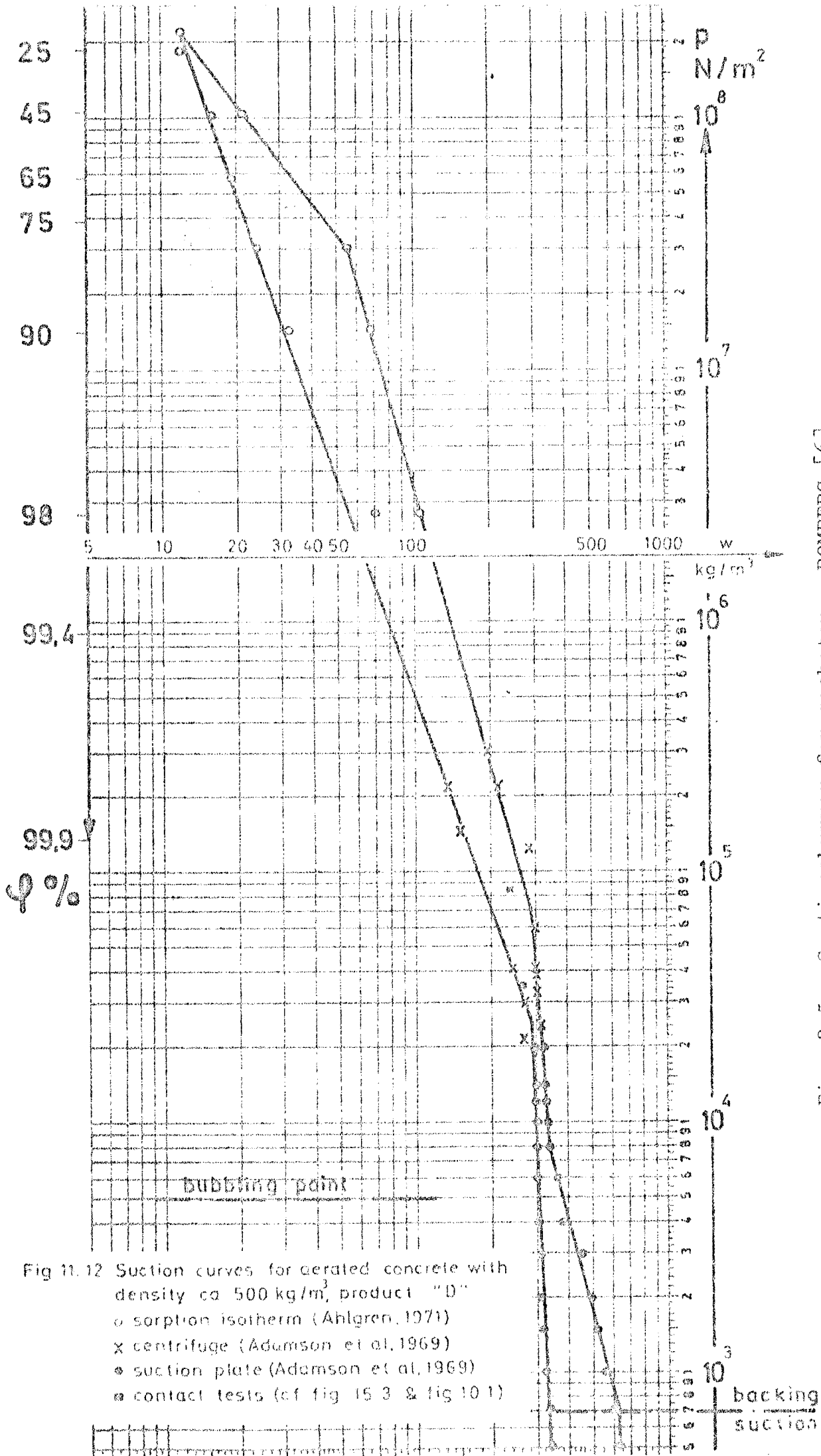


Fig. 3.5. Suktionskurver for gasbeton. BOMBERG [6].

Fig 11.12 Suction curves for aerated concrete with density ca  $500 \text{ kg/m}^3$ , product "D"

- $\circ$  sorption isotherm (Ahlgren, 1971)
- $\times$  centrifuge (Adamson et al, 1969)
- $\bullet$  suction plate (Adamson et al, 1969)
- $\blacksquare$  contact tests (cf fig 15.3 & fig 10.1)

### 3.4. Porestørrelsesfordelingen

Det er af væsentlig betydning at kende porestørrelsesfordelingen for et materiale, hvis man vil forsøge at forklare de fysiske transportmekanismer eller opbygge en matematisk model. Porestørrelsesfordelingen kan bestemmes ved måling på forstørrede fotografier af materialet, men denne metode er tidskrævende og meget kompliceret. I stedet vil der normalt blive anvendt forskellige fysiske metoder, hvor størrelsen, man måler, afhænger af porestørrelserne. En gennemgang af metoderne findes i BANKVALL [5].

For gasbeton (Ytong  $650 \text{ kg/m}^3$ ) findes en meget anvendt kurve (fig. 3.6), som er angivet af KRISCHER [21].

Den er fundet ved brug af 3 forskellige metoder, centrifugeforsøg, kontaktforsøg (gasbeton-tegl) samt ud fra sorptionskurven.

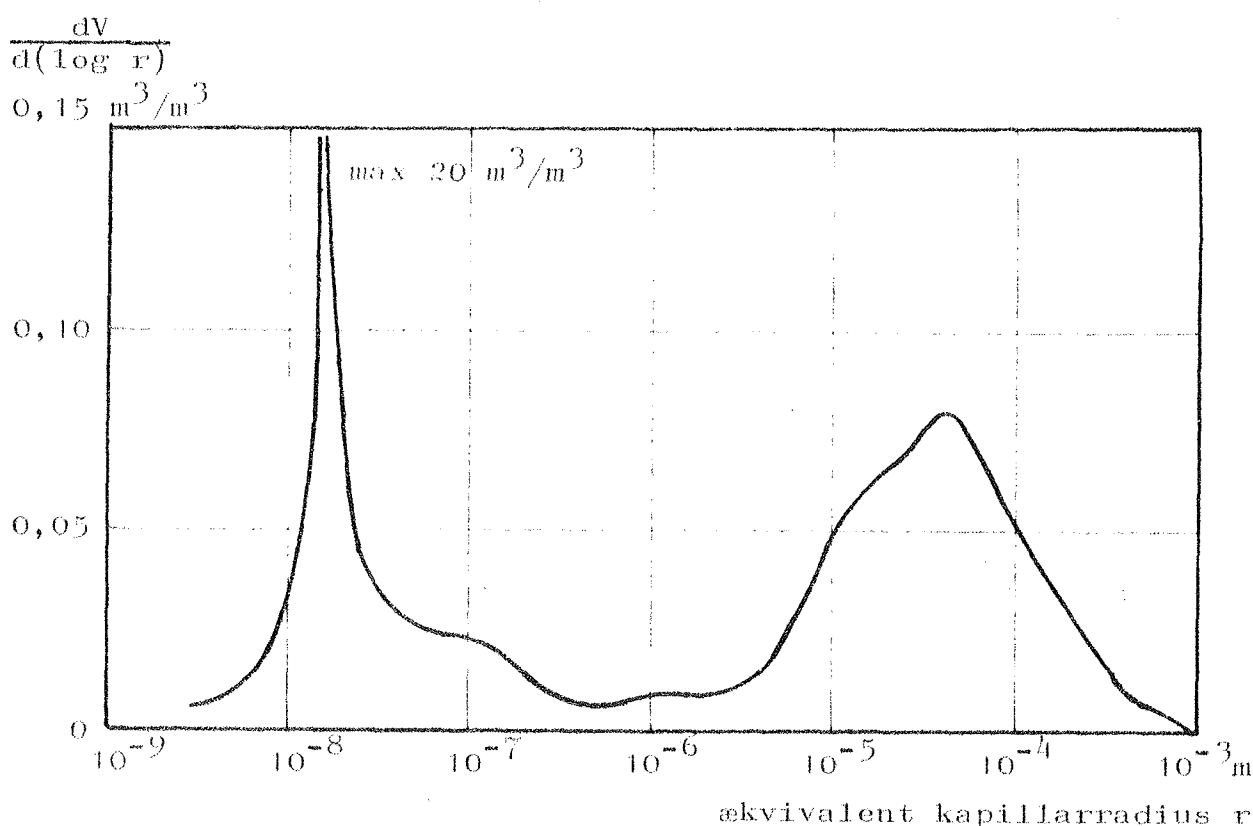


Fig. 3.6. Kapillarfordelingskurve for gasbeton (Ytong  $\rho=650 \text{ kg/m}^3$ ). KRISCHER [22].

Capillary distribution curve for cellular concrete (Ytong  $\rho=650 \text{ kg/m}^3$ ). KRISCHER [22].

Kurven viser, at der findes to adskilte områder med mange porer, den ene del er mikroporer med kapillarradius  $< 10^{-7}$  m, den anden makroporer. En måling på den ved forsøgene anvendte gasbeton (gasbeton  $550 \text{ kg/m}^3$ ) er gennemført ved brug af Laboratoriet for Bygningsmaterialers kviksølvporosimeter. Ved denne metode med indtrykning af kviksølv og måling af den indpressede mængde i afhængighed af trykket er det muligt at beregne porestørrelsesfordelingen, hvis der anvendes en antagelse af, hvordan porerne geometrisk ser ud. Normalt tænkes porerne som cylindriske rør, og med denne model kan porestørrelsesfordelingen beregnes fra radius  $88 \text{ } \mu\text{m}$  til  $0,02 \text{ } \mu\text{m}$  for det anvendte måleudstyr. Den beregnede porestørrelsesfordeling ses på fig. 3.7.

$$\frac{dV}{d(\log r)}$$

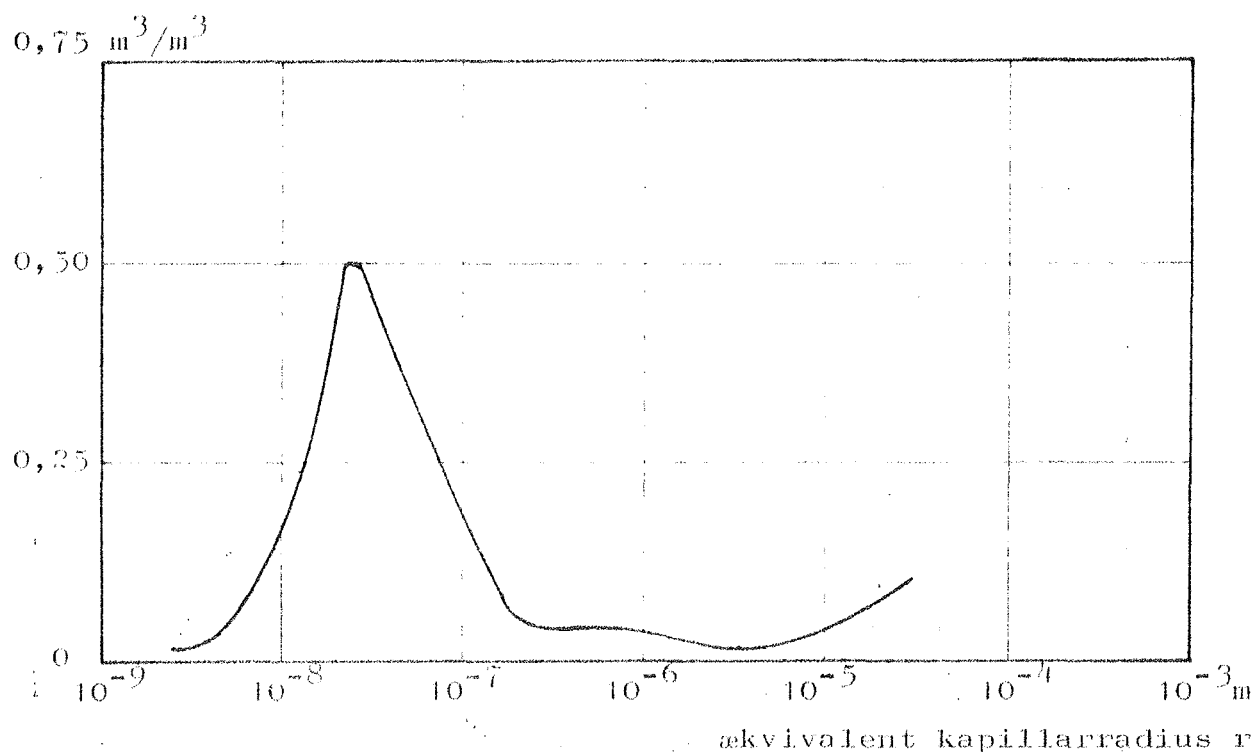


Fig. 3.7. Kapillarfordelingskurve for den anvendte gasbeton ( $\rho=550 \text{ kg/m}^3$ ) målt med Hg-indtrykning ved Lab. f. Bygningsmaterialer, DTH.

Capillary distribution curve for the used cellular concrete ( $\rho=550 \text{ kg/m}^3$ ) measured by Hg-penetration at the Building Materials Laboratory, DTH.

Sammenlignes resultatet med KRISCHER's måling, vil man bemærke, at der i begge tilfælde findes et stort antal porer med en radius på  $2 \cdot 10^{-8}$  m. For KRISCHER's vedkommende er det i et meget snævert interval med mange porer, medens vore målinger viser en større spredning. Dette er absolut forklarligt, idet KRISCHER's kurve over fugtindholdet i afhængighed af kapillarradien netop udviser en stor ændring, som ikke er veldefineret ud fra de udførte målinger. En mindre ændring af denne kurve ville sikkert give resultater svarende til vore. Med Laboratoriet for Bygningsmaterialers udstyr har det ikke været muligt at måle porer større end med  $r = 2 \cdot 10^{-6}$  m. Resultaterne viser tendens til det samme maksimum på ca.  $r = 5 \cdot 10^{-5}$  m som KRISCHER's kurve viser. Det store antal mikroporer ( $r = 2 \cdot 10^{-8}$  m) er bestemt af gasbetons krystallinske opbygning, som det ses bl.a. på fig. 3.9.

Der findes enkelte andre målinger på gasbetons porestruktur, bl.a. SNECK [39], [40], som for et enkelt prøvelegeme (No.38) finder et maksimalt poreantal ved  $r = 3 \cdot 10^{-8}$  m. Dette svarer godt til de tidligere resultater.

### 3.5. SEM-billeder

Ved brug af et scanning-elektron mikroskop (SEM) ved Laboratoriet for Fysisk Metallære (DtH) er der blevet taget nogle billeder af den ved forsøgene anvendte gasbeton. En fortolkning af billederne oplyser, at gasbetonen består af trikalium-silikat-hydrat, kaldet Tobermorite, med en afstand mellem de plader, stoffet består af, på 11 ångstrøm.

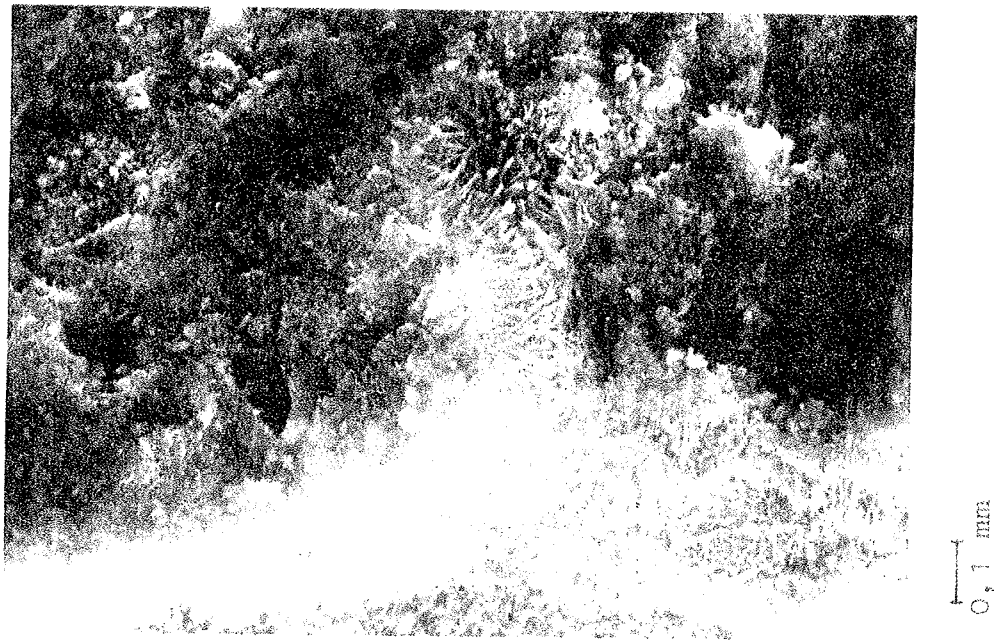


Fig. 3.8. Scanning-elektron mikroskop (SEM) billede. Forstørrelse ca. 500 x. Øverst brudflade i porevæg. Nederst porebund dækket af Tobermorite (11 Å) krystaller.

Scanning-electron microscope (SEM) photo. Magnification about 500 x. Upper part shows rupture area in pore wall. Lower part shows pore bottom covered by Tobermorite (11 Å) crystals.

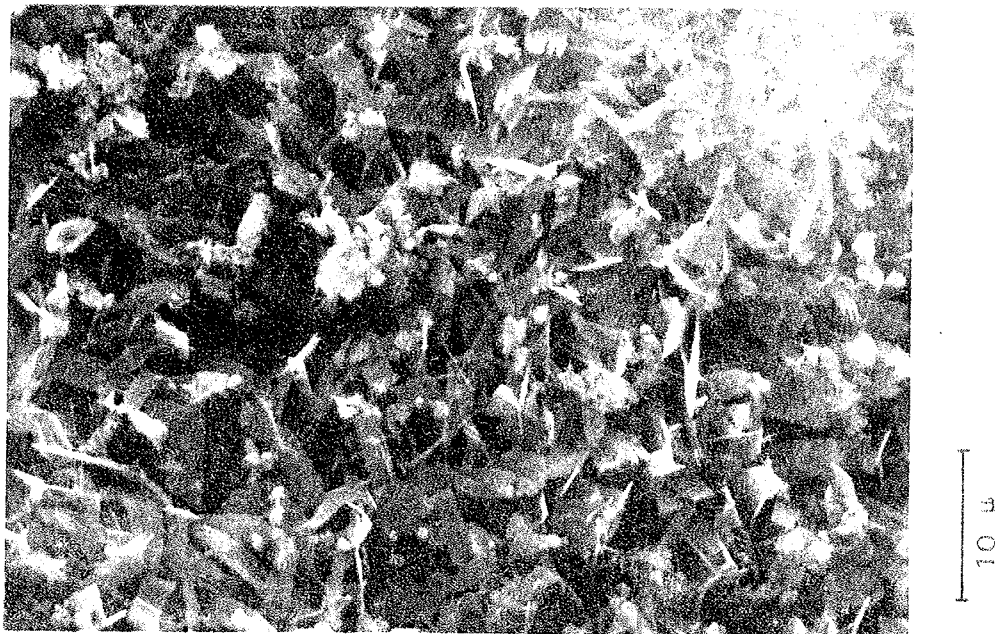


Fig. 3.9. SEM-billede, forstørrelse ca. 1500 x. Krystalstruktur i bunden af en makropore  $\sim 1 \text{ mm}^2$ . De vatlignende partikler er slibestov fra prøvens tildannelse.

SEM-photo, magnification about 1500 x. Crystalline structure in bottom of pore  $\sim 1 \text{ mm}^2$ . The cotton-wool-like particles are grind dust from the shape of the sample.

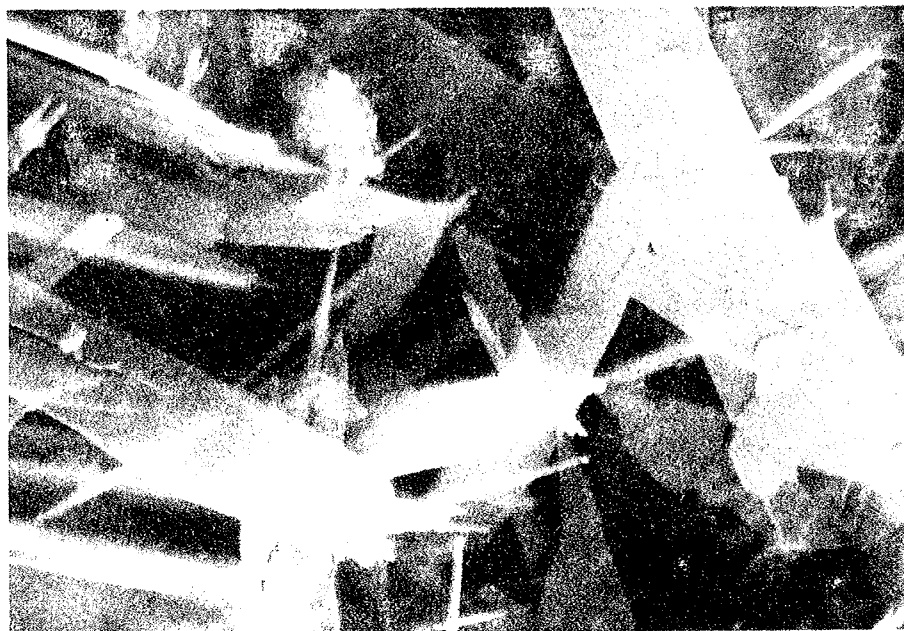


Fig. 3.10. SEM-billede, forstørrelse ca. 9000 x. Samme område som foto 3.9. Tobermoritens pladestruktur ses. Pladeenderne er spaltet på grund af, at prøven har været udtørret ved 105°C.

SEM-photo, magnification about 9000 x. The same area as photo 3.9. The plate structure of the Tobermorite is seen. The ends of the plates are split because the sample has been dried at 105°C.



#### 4. MÅLING AF FUGTINDHOLD

##### 4.1. Målemetoder

Metoderne for måling af fugt er mangfoldige, og derfor er det vigtigt at kende de forskellige metoders fordele og ulemper [1].

Veje-tørre metoden er den vigtigste metode og er meget anvendt på grund af sin enkelhed. En prøve udtages og vejes (vådvægt), derefter tørres prøven ud, f. eks. i et varmeskab ved 105°C eller i en deccicator, indtil ligevægt er opnået (tør vægt). Vægtforskellen mellem vådvægten og tør vægten udgør det fordampede vand og dermed fugtindholdet. Metoden er destruktiv, og dette er en væsentlig ulempe, hvis det drejer sig om forsøg, der skal fortsætte. Men udføres prøveudtagningen og flytningen omhyggeligt, er der en stor præcision i metoden, kun afhængig af målefejlen på vejningen. Da man kun får bestemt middelfugtindholdet i de stykker, man udtager, er det vigtigt at udtage prøverne de rigtige steder. Det kan ved en omhyggelig gennemskæring af prøver lykkes at bestemme fugtfordelinger, men metoden er ikke særlig egnet.

De elektriske metoder udgør en vigtig gruppe, hvor man måler modstand eller kapacitet, som begge er afhængige af materialets fugtindhold. Begge metoder kræver kalibrering for hvert materiale for at bestemme fugtindholdet. For begge metoder gælder det desuden, at man måler mellem to elektroder, og derfor er det vigtigt, at den elektriske overgangsmodstand fra elektrode til materiale er ringe, d.v.s. man må indstøbe eller fastspænde elektroderne. Målenøjagtigheden er af størrelsesordenen 2% vægt.

Modstanden er afhængig af materialets temperatur, rumvægt, homogenitet og opløste salte. Man kan altså få meget svært ved at kalibrere, hvis man ikke anvender et ensartet materiale under konstante temperaturforhold. Hvis man med denne

metode skal bestemme fugtfordelinger, må man gøre sig klart, at måleområdet mellem de to elektroder ikke kun er forbindelseslinien mellem elektroderne, men et 3-dimensionalt elektrisk felt. Derfor vil det være nødvendigt at tage hensyn til dette, når man omsætter måleresultaterne til fugtindhold.

Kapaciteten er svagt afhængig af temperatur og opløste salte men meget afhængig af, hvilken frekvens der anvendes. Ved lavere frekvenser (under 50 Mhz) er der en indflydelse fra, hvordan vandet er fordelt mellem elektroderne. D.v.s. den samme mængde vand jævnt eller mere inhomogent fordelt behøver ikke at give samme resultat. Hvis frekvensen sættes op, bliver dette problem mindre. Det vil i mange tilfælde være en fordel at anvende mikrobølgefrequenser, f. eks. 3 Ghz, da dette bølgeområde påvirkes kraftigt af materialets dielektriske egenskaber, og indflydelsen fra vandets fordeling er ringe.

De kernefysiske metoder udnytter gamma- eller neutronstråling. Disse metoder udmerker sig ved en stor nøjagtighed, men er nærmest kun anvendelige i laboratoriet. Fugtindholdsbestemmelsen er desuden hurtig og ikke-destruktiv. Der kræves dog kalibrering for hvert materiale, og udstyret er ret kostbart.

Ved anvendelse af gammastråling bliver strålingen absorberet eller spredt i materialet, d.v.s. et større fugtindhold giver en større spredning. Det mest almindelige princip er at anbringe kilde og detektor på hver sin side af måleobjektet, men kilden kan også indstøbes i materialet. Den mest benyttede strålingskilde er Cs 137 med en halveringstid på 33 år. Af hensyn til strålingsfaren vil man anvende små mængder af radioaktivt materiale og foretrække lavenergetisk stråling, som ikke kræver så kraftig afskærmning. Metoden er nøjagtig og velegnet for måling af fugtfordelinger, når strålen er godt kollimeret.

Neutroner vekselvirker med brint og bremses derved ned, og herved kan man også opnå en måling af fugtindholdet. Det må bemærkes, at også andre grundstoffer end brint kan nedbremse neutronerne, bl.a. nogle af de såkaldte "sjældne jordarter". Det mest anvendte princip er at bruge en sonde med en kilde, en blyafskærmning og en detektor. Detektoren opfanger de nedbremsede neutroner, som når frem til den fra kilden. For denne metode er det område, man måler fugtindholdet i, stærkt afhængig af fugtindholdet, f. eks. for gasbeton ved 2 vol% vand et kugleformet område med en radius på 150 cm, mens man ved 30 vol% vil få 15 cm i radius. Dette vil gøre målinger af fugtfordelinger noget vanskeligt, men ved måling af middelfugtindholdet kan fås stor nøjagtighed.

Den kemiske metode udnytter reaktioner, hvor vand reagerer med et stof, f. eks. kalciumcarbid. Metoden kan kun anvendes til bestemmelse af middelfugtindhold og er destruktiv.

Den hygrometriske metode udnytter, at man kender sorptionskurven for det materiale man måler på, og derfor ud fra en måling af den relative fugtighed inde i eller på overfladen af materialet kan bestemme fugtindholdet. Metoden er unøjagtig bl.a. på grund af hysteresese og kan derfor kun bruges til en grov fugtindholdsbestemmelse.

Den termiske metode udnytter, at  $\lambda$ -værdien er afhængig af fugtindholdet. Man benytter normalt at tilføre en varmemængde og derefter i en vis afstand måle temperaturstigningen, som er afhængig af  $\lambda$ -værdien. Denne metode kræver kalibrering, og man må gøre sig klart, at når man varmer op for at måle, fordamper man samtidigt noget af fugten.

Den spektrometriske metode udnytter, at de forskellige grundstoffer absorberer stråling i ganske bestemte frekvensområder. Ved kernespinsresonansmetoden måler man energiabsorptionen for brintatomerne i et kraftigt, stationært magnetfelt, hvor man samtidig har et magnetisk højfrekvensfelt.

## 4.2. Gamma transmissionsmåling

### 4.2.0. Indledning

Det blev valgt at anvende gamma transmissionsmålinger til at bestemme fugtfordelingerne, da denne metode som tidligere nævnt har store fordele. Desuden har metoden i stor udstrækning været anvendt inden for "soil science" [9], [10], [14], [43], hvor man også ønsker et nøjagtigt kendskab til fugtfordelingerne. En undersøgelse af mulighederne for at skaffe et sådant udstyr viste, at Isotopcentralen havde fremstillet et udstyr for Hydroteknisk Laboratorium ved Den kongelige veterinær- og landbohøjskole i København. En undersøgelse viste, at et udstyr af næsten tilsvarende art kunne bruges til målinger af fugtindhold i gasbeton.

### 4.2.1. Teori

Svækkelsen af en monoenergetisk gammastråling for en konstant afstand mellem kilde og detektor er givet ved

$$\ln N = \ln N_0 - \mu \rho x$$

hvor  $N$  er intensiteten med absorberende materiale (counts/sek)

$N_0$  er intensiteten uden absorberende materiale (counts/sek)

$\mu$  er svækkelseskoefficienten for materialet ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$\rho$  er densiteten for materialet ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$x$  er materialets tykkelse (cm)

Absorptionen af strålingen skyldes Compton-spredning, Compton-absorption, Raleigh-spredning samt den fotoelektriske effekt.

Absorptionen for 2 materialer er givet ved

$$\ln N = \ln N_0 - (\mu \rho x)_a - (\mu \rho x)_b$$

hvor  $a$  er materialværdierne for det ene materiale

$b$  er materialværdierne for det andet materiale.

Hvis man anvender stor tællehastighed for impulserne, er det nødvendigt at korrigere for måleinstrumentets dødtid, d.v.s. hvornår 2 impulser kommer så tæt, at de opfattes som 1.

Anvendes meget langsomme tællehastigheder, er det nødvendigt at korrigere for den naturlige baggrundsstråling, som findes overalt. Korrektionerne foretages ved brug af formen:

$$N = \frac{C}{T - C \cdot \tau} - B$$

hvor N er den korrigerede tællehastighed (counts/sek)

C er antallet af impulser (counts)

T er tælle tiden (sek)

$\tau$  er dødtiden (sek/counts)

B er baggrundsstrålingen (counts/sek)

I de følgende formler er det altid forudsat, at der er korrigeret for baggrund og dødtid.

Den totale formel for de anvendte gasbetonprøvelegemer er ligesom formelen for absorptionen i 2 materialer, i dette tilfælde vil der blot komme flere ( $\mu\rho x$ )-led, da prøvelegemerne indeholder flere stoffer. Der vil indgå svækkelserne for gasbeton, vand, lim, akryl samt Al-folie. En ret kompliceret formel, som reduceres meget, når den skal anvendes, idet de fleste led er konstante for det anvendte prøvelegeme under forsøgene.

#### 4.2.2. Statistik

Udstrålingen fra et radioaktivt materiale har en statistisk karakter, der må tages hensyn til, når man vurderer resultaterne. Derfor vil en måling med gammastråling ikke give den "korrekte" værdi for rumvægten eller vandindholdet, men målingen vil ligge inden for visse grænser fra den korrekte værdi. Hvis man måler  $\Delta N$  counts i tiden  $\Delta t$  (som vi antager er fri for målefejl), ved man, at den målte værdi er  $\Delta N \pm \sigma$ , hvor  $\sigma$  er standardafvigelsen. Det kan vises, at

$$\sigma = \sqrt{\Delta N}$$

Standardafvigelsen giver 68% sandsynlighed for, at den målte værdi  $\pm$  standardafvigelsen indeholder den korrekte værdi. Fra ligningen for standardafvigelsen får man, at for  $10^5$  counts er "fejlen" 0,31%, og for  $10^6$  counts er "fejlen" 0,1%.

Denne usikkerhed på målingerne er det nødvendigt at tage hensyn til, når man planlægger forsøgsopstillingen og måletiden. Af hensyn til stor sikkerhed er det nødvendigt at måle et stort antal impulser. Dette kan opnås ved at bruge lange måletider og en kilde med kraftig udstråling. Samtidig vil der også være ting, der trækker i modsat retning, f. eks. må man sikre sig, at måletiderne ikke bliver så lange, at fugtfordelingen kan nå at ændre sig under måletiden, idet prøverne normalt må udtages af forsøgsopstillingen. Det er derfor nødvendigt at finde et passende kompromis. Hvis prøvelegemernes dimension ikke er fastlagt af andre hensyn, er det muligt at ændre dimensionerne, så der opnås stor målenøjagtighed.

Vi har valgt at anvende en fast måletid på 1,38 min., og dette medfører naturligvis, at usikkerheden vil variere med fugtindholdet. Vi har beregnet standardafvigelserne på fugtindholdet under hensyntagen til usikkerheden på de indgående faktorer:

$$\begin{array}{ll} 5 \text{ vol\% fugt} & \sigma = 0,2 \text{ vol\%} \\ 60 \text{ vol\% fugt} & \sigma = 0,5 \text{ vol\%} \end{array}$$

#### 4.2.3. Måleudstyr

Strålingskilden og detektoren er monteret i en fast position på en stålplade. Mellem kilde og detektor findes et cirkulært hul med en mekanisme til at hæve eller sænke prøvelegemet. På fig. 4.1 ses gammamåleudstyret med BASC-instrument samt håndtag til hæve-sænke-mekanisme i kassen. Oven på kassen ses detektoren, og bag skiltet findes målefeltet og kilden.

Kilden er en 100 mCi  $\text{Am}^{241}$  med en 60 keV gammaudstråling. Strålingen er ikke helt monoenergetisk, men den største del ligger på 60 keV, så formlerne i afsnit 4.2.1. kan bruges. Halveringstiden for  $\text{Am}^{241}$  er 458 år, så det er ikke nødvendigt at korrigere for kildens henfald, selv ved måleperioder på nogle år. Kilden er monteret i en 5x5x4 cm messingklods

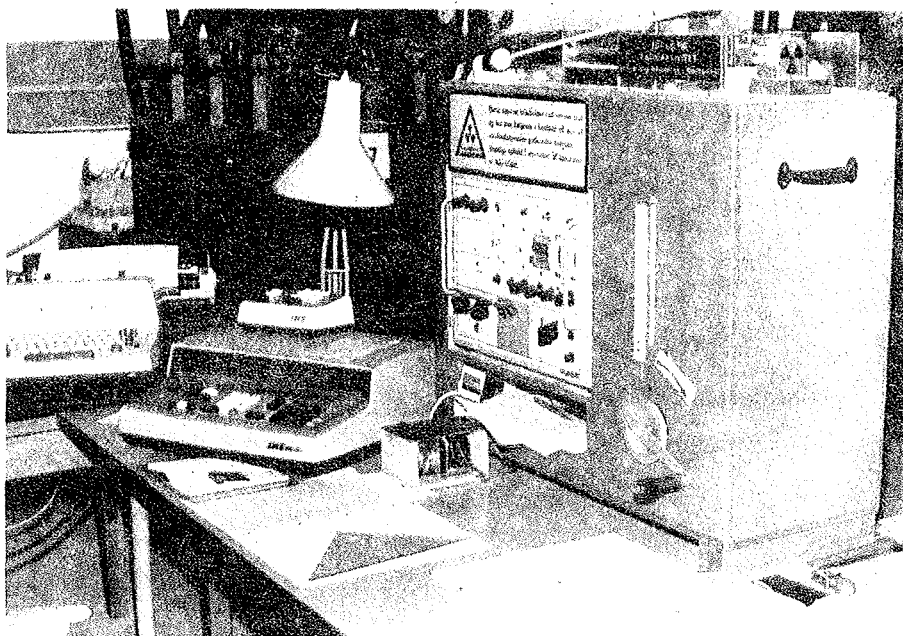


Fig. 4.1. Gammamåleudstyr med kilde, detektor og BASC. Til venstre del af IME-regneanlæg.

Gamma-ray-equipment with source, detector and BASC. To the left an IME desk calculator.

med et 7 mm cirkulært hul i retning mod detektoren. For den kilde, som her anvendes, er 1 cm messing tilstrækkeligt til beskyttelse mod farlig stråling, desuden er kilden forsynet med lås, så den ikke udsender farlig stråling, når den ikke bruges. Messingklodsen med kilden er forsynet med en forskydelig messingstang med 3 kollimatorer i forskellige højder.

Detektoren er en NEA standard-gamma-scintillationsdetektor med en 1" x 1" thallium-aktiveret NaI krystal, fotomultiplikator og forstærker. Detektoren er skærmet af en blycylinder, så baggrundsstrålingen reduceres til ca. 2,2 counts/sek.

Foran detektoren findes en kollimator, som er udskiftelig. Ved at skifte kollimator kan man øge eller mindske det areal, som detektoren måler strålingen fra. En god kollimering medfører, at indflydelsen fra spredt stråling reduceres væsentligt. Men samtidigt er det med en smal stråle nødvendigt at anbringe kilde og detektor meget omhyggeligt over for hinanden.

Detektoren er forbundet med et BASC måleinstrument [41], som har høj stabilitet mod spændings- og temperaturvariationer. I BASC'en findes en en-kanals pulshøjdeanalysator. Instrumentet har desuden et tælleværk, et stopur samt et viserinstrument, som angiver antallet af impulser pr. sek. Dødtiden for instrumentet er  $5 \mu$  sek/count. Vi har forsynet BASC'en med et synkronur, så målingerne kan foretages med fast tid.

Udstyret blev leveret fra Isotopcentralen i København i aug. 1971 til en totalpris på ca. 50.000 kr.

#### 4.2.4. Kalibrering

Kalibreringen er blevet udført med et sæt kollimatorer, som giver en stråle på ca. 5 mm's højde og 10 mm's bredde. De numeriske værdier, som gives senere, er for disse kollimatorer, og hvis der bruges andre, eller de geometriske forhold mellem kilde og detektor ændres, vil værdier muligvis ændres. Strålingsintensiteten  $N_0$  uden absorberende materiale må bestemmes indirekte, da måleinstrumentet ikke kan måle hele udstrålingen. Ved at måle på x, y og x+y cm messing fås:

$$\ln N_x = \ln N_0 - (\mu \rho) x$$

$$\ln N_y = \ln N_0 - (\mu \rho) y$$

$$\ln N_{xy} = \ln N_0 - (\mu \rho)(x+y)$$

hvor  $(\mu \rho)$  er for messing. Ved at sammensætte ligningerne fås:

$$\ln N_0 = \ln N_x + \ln N_y - \ln N_{xy}$$

Værdien af  $\ln N_0$  blev fundet til 9,903,  $\sigma = 0,001$ .

Svækkelseskoefficienten  $\mu$  for vand fås ved måling på plexiglas-cylindre med og uden vand. Herved fås formelen:

$$\mu_w = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{(\rho \cdot x)_w}$$

hvor  $N_1$  er intensiteten med vand (counts/sek)

$N_2$  er intensiteten uden vand (counts/sek)

x er plexiglas-cylindrens indvendige diameter (cm)



Værdien af  $\mu_w$  blev fundet til  $0,1907 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $\sigma = 0,0014 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Svækkelseskoefficienten for vand vil være temperaturafhængig, da rumvægten for vandet varierer, men kun i meget ringe grad. Teoretiske beregninger (GRODSTEIN [13], HUBBELL [19]) af  $(\mu \rho)_w$  giver  $0,204 \text{ cm}^{-1}$ , og vore målinger giver  $0,191 \text{ cm}^{-1}$ . Disse beregninger blev gennemført under den forudsætning, at enhver Compton spredning medfører, at 1 gamma-kvant bliver skubbet ud af strålen og derfor ikke måles af detektoren. I virkeligheden vil det være muligt for noget af gammastrålingen at nå detektoren og blive målt efter en eller flere spredninger (GROENEVELT [14]). Dette kræver dog, at kvanterne har tilstrækkelig energi, og vil medføre, at antallet af impulser øges i forhold til det teoretiske tilfælde. Af samme grund vil den målte svækkelseskoefficient blive lavere end den teoretiske.

For svækkelseskoefficienten for vand i gasbeton har vi fundet, at den er afhængig af vandindholdet, se fig. 4.2. Dette skyldes, at den spredte stråling øges med vandindholdet.

#### 4.2.5. Måling og beregning af fugtindhold

Målingerne af fugtindholdet foretages i en fast vinkel -  $90^\circ$  i forhold til en markeret linie på prøvelegemerne. Målingerne foretages i 9 højder med 5 mm intervaller (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 mm fra den ene endeflade af prøvelegemet). Med den faste måletid på 1,38 min. kan man på 20 min. nå at tage prøvelegemet ud af forsøgsopstillingen, måle 9 værdier samt sætte det på plads igen. Forsøg har vist, at gentagne målinger, hvor prøvelegemet flyttes ind imellem, giver samme resultat (når man tager hensyn til de statistiske variationer). Den metode, der anvendes til placering af prøvelegemerne, er altså nøjagtig nok.

Fugtindholdet beregnes ud fra formelen:

$$\psi = \frac{\ln N_0 - \ln N_z}{\mu \cdot \rho \cdot x}$$

hvor  $\psi$  er fugtindholdet ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\mu$  er svækkelseskoefficienten for vand ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) (se fig. 4.2)  
 $\rho$  er densiteten for vand ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $x$  er gasbetonens tykkelse (cm)  
 $N_0$  er intensiteten for tørt materiale (counts/sek)  
 $N_z$  er intensiteten for fugtigt materiale (counts/sek)

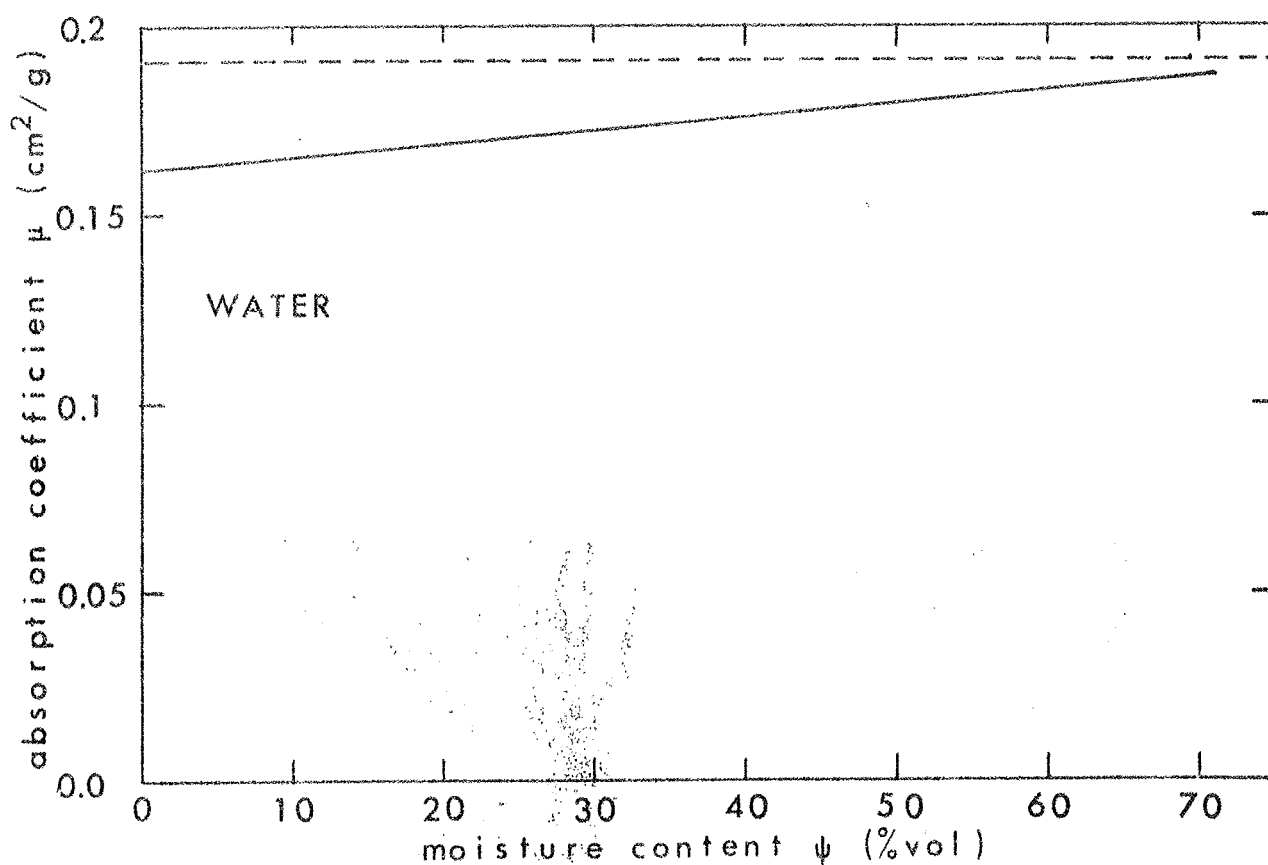


Fig. 4.2. Absorptionskoefficienten for vand i afhængighed af fugtindholdet i gasbeton. Den punkterede linie er den teoretiske værdi for vand. Den anden linie angiver de målte værdier.

The absorption coefficient of water plotted against the moisture content of porous concrete. The dotted line is the theoretical absorption coefficient for water. The other line gives the measured values.

Bestemmelsen af intensiteten for tørt materiale må foretages indirekte ved måling på materiale med et kendt hygroskopisk fugtindhold, og derefter beregnes intensiteten for det tørre materiale. Prøvelegemerne kan ikke tåle at blive tørret ud ved  $105^{\circ}\text{C}$ , da plexiglasset bliver plastisk.

Beregningen af fugtindholdet foretages på en programmerbar bordregnemaskine (fabrikat IME, se fig. 4.3), og da hver beregning tager ca. 1 min., kan den afsluttes indenfor de 1,38 min., den næste måling varer. Dette medfører, at en kontrolmåling kan ske meget hurtigt, hvis noget ser mærkværdigt ud. Beregningerne skrives ud i et skema (se fig. 4.4), så alle oplysningerne er samlede på ét stykke papir. Samtidig er regnemaskinen forsynet med en forbindelse til en puncher, som huller de nødvendige data ud på en papirstrimmel. Denne strimmel konverteres senere til hulkort, som er lette at arbejde med, når der skal ske videregående beregninger af fugttransporten.

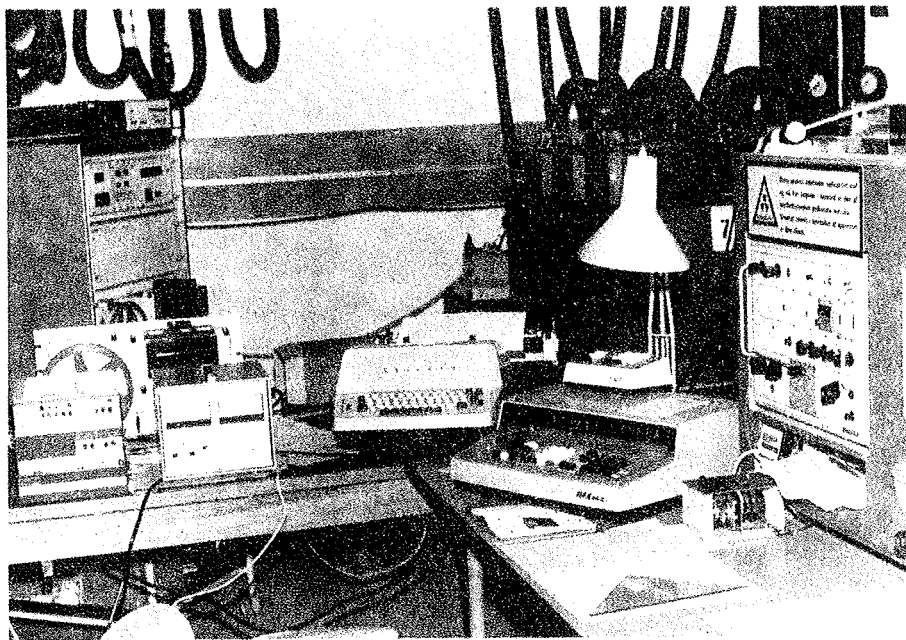


Fig. 4.3. Til højre gammamåleudstyr, til venstre bordregnemaskine med programmeringsenhed samt puncher og skrivemaskine.

To the right the gamma-ray-equipment, to the left a desk calculator with programming devices, puncher and typewriter.

Calculation of water content

corrected radiation height from dry specimen      measured radiation      corrected radiation from wet specimen      water content

Height mm	kor. strål. højde counts/sec	kor. strål. bredde mm	kor. strål. vinkel grad	kor. strål. vinkel grad	kor. strål. vinkel grad	kor. strål. vinkel grad
50	2119,40	,00240	1,384	1751,83	,00261	9,53
45	2140,70	,00240	1,384	1809,08	,00257	8,44
40	2206,80	,00240	1,387	1932,69	,00248	6,66
35	2150,20	,00240	1,387	1955,96	,00246	4,77
30	2145,40	,00240	1,385	1971,46	,00246	4,27
25	2166,60	,00240	1,387	2020,80	,00242	3,52
20	2221,90	,00240	1,384	2056,70	,00240	3,90
15	2183,20	,00240	1,386	2029,03	,00242	3,69
10	2175,70	,00240	1,384	2013,60	,00243	3,78
159	22	5507,7	2001	1		g = 3,52

måling på: 159  
dato : 15.9.1972

side opad: tag  
vinkel : 90°  
volumen : 578,3 cm<sup>3</sup>

vægt våd : 587,93 g  
- tør : 559,68 g  
vand: 28,25 g

vand: 4,89 vol%  
weighted water content:

kalibr.kurve: 1

sign. N

Fig. 4.4. Beregningskema. Calculation form.

Beregner man middelværdien af fugtindholdet ud fra gamma-transmissionsmålingerne og sammenligner dem med det vejede fugtindhold, vil man normalt finde en difference (fra 0 til 1 vol% fugtindhold). Denne forskel skyldes, at den anvendte kalibreringskurve ikke er helt korrekt. Forskellen fjernes ved at omregne den målte fugtfordeling til en ny, så middelværdien bliver den samme som den vejede. Denne omsætning foretages ved brug af et lille EDB-program.

En anden mulighed ville være at fremstille en bedre kalibreringskurve, men da man ved denne metode og den ovennævnte korrektionsmetode vil få næsten samme slutresultat, har vi valgt at anvende korrektionsmetoden. Men ved brug af EDB vil det altid senere være muligt at regne materialet om efter den anden metode.

Når man foretager korrektioner, er det meget vigtigt at vide, om den målte fugtfordeling er korrekt. Det vil kun være tilfældet, hvis en måling ikke påvirkes af fugtindholdet i nabopunkterne. Der kunne tænkes at opstå problemer ved store fugtgradienter samt ved overflader. Egne målinger (NIELSEN [30]) viser, at målingerne er uafhængige af fugtindholdet i nabopunkterne. Ved målinger 5 mm fra en overflade er det dog nødvendigt at lægge en 5 mm plexiglasplade oven på prøvelegemet, men dette er også praktisk, da det vil forhindre større fordampning eller kondensation af fugt i prøvelegemet under målingen.

## 5. UDTØRRING

### 5.0. Indledning

En af de processer, der har interesseret forskere i mange år, er udtørring. Denne proces er meget væsentlig inden for byggematerialeforskningen, idet mange materialer ved fremstillingen indeholder vand eller ved oplagring kan få store vandindhold. Disse overskud af vand i forhold til ligevægtsfugtindholdet i den omgivende luft fjernes ved en ikke-stationær udligning (udtørring) af vandindholdet. Nogle af de mest betydningsfulde overvejelser ved denne proces stammer fra KRISCHERS arbejder [21], [22], som vi derfor vil gennemgå for lufttørring.

### 5.1. KRISCHERS teori for udtørring

KRISCHER har udviklet en teori for udtørningshastighedens variation med tiden for konstante, ydre betingelser (temperatur, luftfugtighed, lufthastighed). Det forudsættes, at fugttransporten er analog med varmetransporten uden sammenkobling. For porøse, hygroskopiske materialer kan udtørringen karakteriseres ved 3 faser (se fig. 5.1), når materialet er tilstrækkeligt fugtigt ved starten.

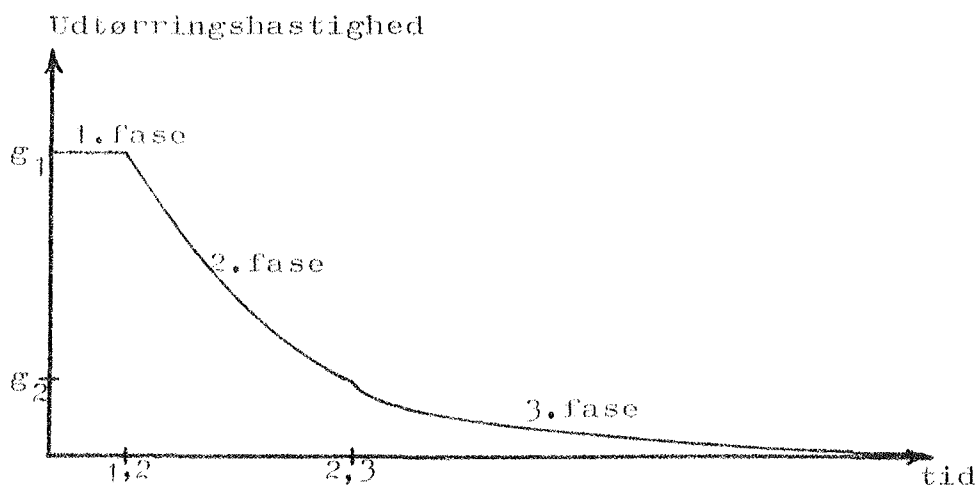


Fig. 5.1. Udtørningshastighedens variation med tiden.  
Drying-out rate versus time.

I første fase er udtørningshastigheden konstant. Dette skyldes, at kapillarsugning fra materialets indre til stadi-ghed kan opretholde en fugtig overflade. Regnes overfla-den ækvivalent med en fri vandoverflade, fås udtørnings-hastigheden i 1. fase som:

$$g_1 = \beta(p_s - p)$$

hvor  $g_1$  = udtørningshastigheden  $[\text{kg/m}^2 \text{ s}]$

$\beta$  = fugtovergangstallet  $[\text{s/m}]$

$p_s$  = mættede dampes tryk i den omgivende luft  $[\text{N/m}^2]$

$p$  = vanddamptryk i den omgivende luft  $[\text{N/m}^2]$

Da fugtovergangstallet er afhængig af temperatur og luftha-stighed, følger at udtørningshastighed alene er afhængig af omgivelserne. Udtørningshastigheden  $g$  vil være konstant, indtil materialets kapillarkræfter ikke mere kan opretholde en fugtig overflade, d.v.s. den maksimale hygroskopiske fug-tighed nås på overfladen.

På dette tidspunkt  $t_{1,2}$  indtræder en ny fase, idet en del af materialet nær overfladen kommer ned på hygroskopisk fugt-indhold. Dette medfører, at under 2. fase sker udtørningen som en kombination af kapillartransport og vanddampdiffusion. Udtørningshastigheden aftager under 2. fase og konvergerer mod en værdi  $g_2$  svarende til, at kapillartransporten er op-hørt.

$$g_2 = \frac{\delta}{d} (p_s - p)$$

hvor  $\delta$  = diffusionstallet  $[\text{s}]$

$d$  = tykkelsen  $[\text{m}]$

Til tiden  $t_{2,3}$  er hele materialet kommet ned på hygroskopisk fugtindhold, hvorefter udtørningen sker som en ren vanddamp-diffusion.

Til slut vil materialet komme i ligevægt med omgivelsernes relative fugtighed. Ligevægtsfugtindholdet kan aflæses af sorptionskurven.

Det bør tilføjes, at den optegnede sammenhæng (fig. 5.1) mellem udtørningshastighed og tid er teoretisk. Ved forsøg findes de angivne knæpunkter, men ikke så skarpe. For  $t_{2,3}$  gælder, at den for nogle materialer ikke kan ses af udtørningskurven.

På grundlag af denne teori er det også muligt at beregne udtørningens varighed, se f.eks. LUND-HANSEN [25] og PIHLA JAVAARA [33].

Det er ved teorien forudsat, at materialet er i temperatur-ligevægt med omgivelserne, men denne forudsætning gælder kun for de sidste faser. Ved stor udtørningshastighed kan for-dampningen af vand fra overfladen medføre en lavere tempera-tur i prøvelegemet. Man har normalt altid regnet med iso-terme forhold, da dette medfører væsentlig simplere bereg-ninger.

#### 5.1.1. Forsøgsresultater

Der er i tidens løb udført i tusindvis af bestemmelser af udtørningshastigheden og middelfugtindholdet, men er man sam-tidig interesseret i fugtfordelingen i materialet, bliver der et meget mere begrænset antal resultater tilbage. Dette hæn-ger sammen med problemerne med måling af fugtindhold uden at ødelægge prøvelegemet. For gasbeton, som er denne rapports materiale, findes forsøg af KRISCHER [21], [22] med bestem-melse af fugtfordelingen ved brug af kapacitetsmålinger ved 10 Mhz. Fig. 5.2 viser fugtfordelinger ved et sådant forsøg med tørvægt  $650 \text{ kg/m}^3$  ved  $35,4^\circ\text{C}$  og 34% RF. På et andet prø-velegeme blev samtidigt temperaturfordelingen målt (fig. 5.3).

Desuden kendes et forsøg fra VAN DER KOOI [20] med bestemmelse af fugtfordelingerne ud fra elektriske modstandsmålinger med vekselspænding. Forsøget blev udført ved  $20^\circ\text{C}$  og 20% RF på gasbeton  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$  (fabrikat Durox). Resultatet fremgår af fig. 5.4.

KOOI har desuden omtalt, at der er udført tilsvarende forsøg på Ytong ( $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$ ) og Siporex ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ).



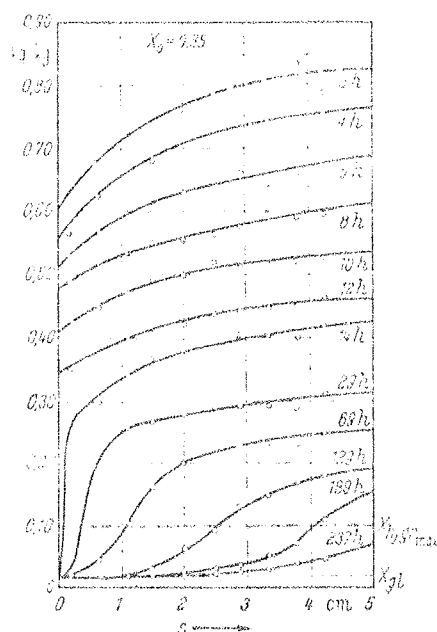


Fig. 5.2. Fugtfordelinger i et prøvelegeme af gasbeton under et udtørningsforsøg (KRISCHER).

Moisture distributions in a sample of cellular concrete during drying experiment (KRISCHER).

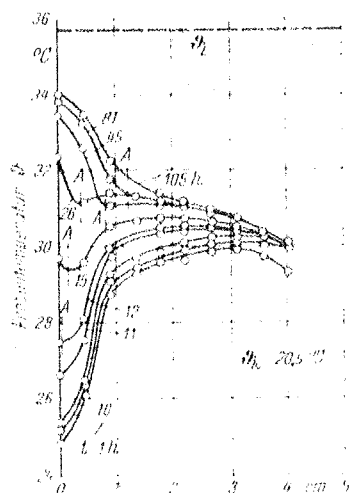


Fig. 5.3. Temperaturfordelinger i et prøvelegeme af gasbeton under et udtørningsforsøg (KRISCHER).

Temperature distributions in a sample of cellular concrete during drying experiment (KRISCHER).

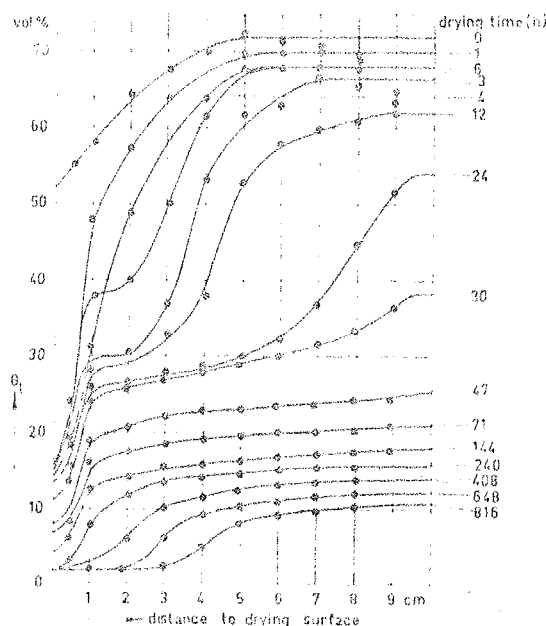


Fig. 5.4. Fugtfordelinger i et prøvelegeme af gasbeton under et udtørningsforsøg (VAN DER KOOL).

Moisture distributions in a sample of cellular concrete during drying experiment (VAN DER KOOL).

#### 5.1.2. Beregning af kapillarledningstallet

Når bestemmelser af fugtfordelingerne er meget vigtige, skyldes det, at kapillarledningstallet kan beregnes ud fra kendskab til fugtfordelingerne.

Under forudsætning af, at beregningerne sker ved fugtindhold over det hygroskopiske fugtindhold, kan man gå ud fra, at fugttransporten sker som ren væsketransport efter ligningen:

$$g = - D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi - K \cdot \text{grad } T$$

hvor  $D$  er kapillarledningstallet,  $D = D(\psi)$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$K$  er termodiffusionstallet,  $K = K(\psi)$  [ $\text{kg}/\text{m s K}$ ]

I dette tilfælde indeholder ligningen to ubekendte, som ikke begge kan bestemmes. Da det sidste led (temperaturindflydelsen) normalt er af væsentlig mindre størrelsesorden, kan man

se bort fra denne del af ligningen (VOS [44]). Dette svarer til, at man anser udtørringen som isoterm. Beregning af  $D = D(\psi)$  sker ud fra KRISCHER [22].

$$D(\psi) = \frac{1}{\left(\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)_{z=0}} \int_0^z \frac{\partial \psi}{\partial t} \partial z$$

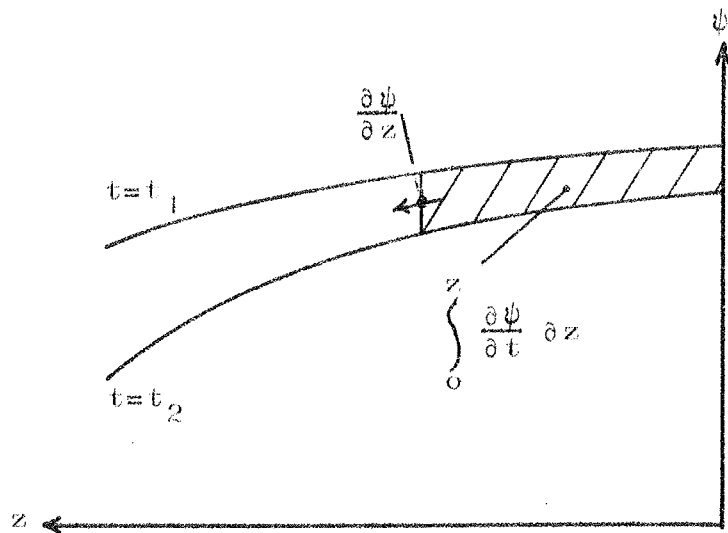


Fig. 5.5. Skitse over beregning af kapillarledningstallet.  
Sketch of calculation of moisture diffusivity.

Sådanne beregninger er udført af KRISCHER [22] og VAN DER KOOI [20] med de tidligere omtalte fugtfordelinger. Resultatet ses i fig. 5.6 og 5.7.

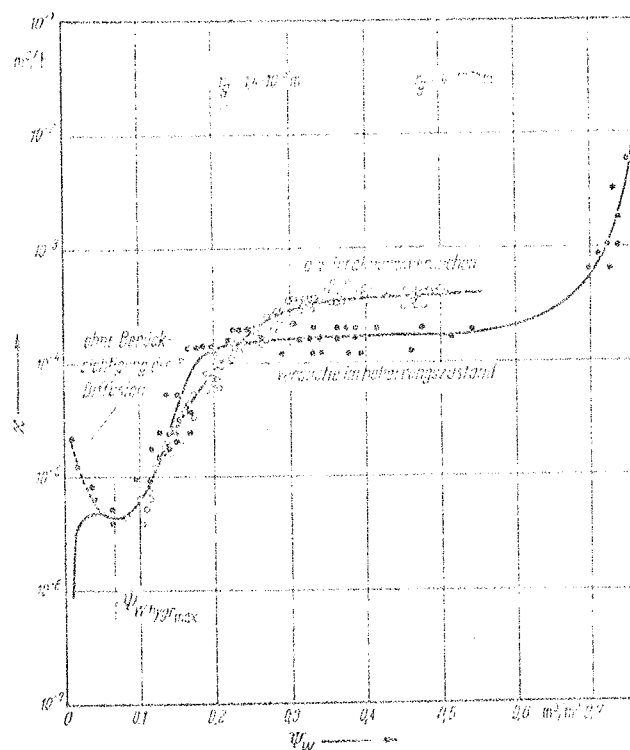


Abb. 164. Verlauf für Ytong ( $P_s = 650 \text{ kg/m}^2$ ).

Zu den Abb. 163 und 164: Abhängigkeit der Feuchtigkeitsleitzahl  $\alpha$  vom Feuchtigkeitsgehalt  $W$  bei  $25^\circ\text{C}$ . Kreise: Meßwerte aus Trocknungsversuchen; Punkte: Meßwerte aus Versuchen im Sättigungszustand.

Fig. 5.6. Kapillarledningstallet for gasbeton beregnet ud fra udtørningsforsøg (cirkler) (KRISCHER).

Moisture diffusivity for cellular concrete by means of drying experiment (circles) (KRISCHER).

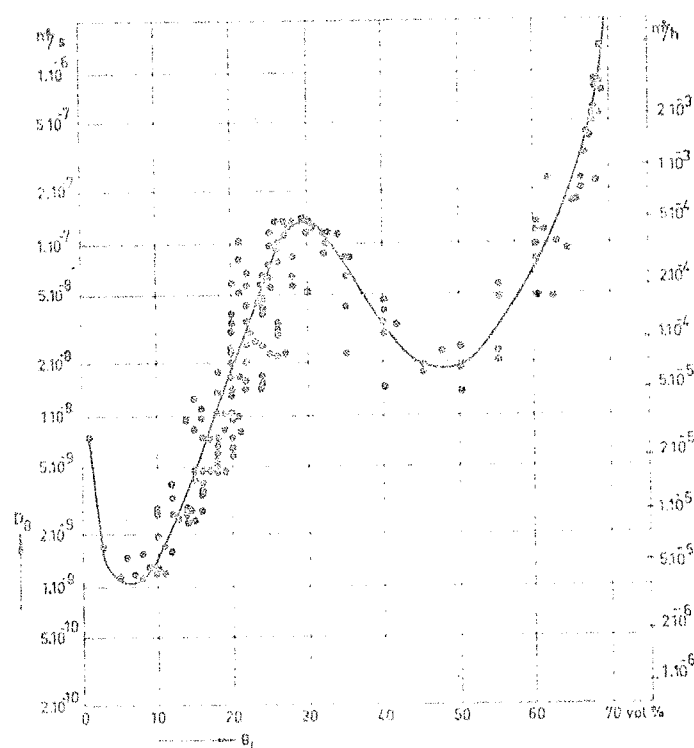


Fig. 5.7. Kapillarledningstallet for gasbeton beregnet ud fra udtørningsforsøg (VAN DER KOOIJ).

Moisture diffusivity for cellular concrete by means of drying experiment (VAN DER KOOIJ).

### 5.1.3. Teorier for kombineret varme- og fugttransport

Da enhver fordampning af fugt kræver energi, må udtørring bestå af en kombination af fugt- og varmetransport. Desuden er problemet ikke-stationært, d.v.s. der fremkommer flere 2.ordens differentiaalligninger. Dette medfører ligninger af et kompliceret udseende, som kun kan løses ved brug af tilnærmelser, og et meget omfattende manuelt regnearbejde med en del simplificeringer eller løsning med numeriske metoder, som kræver EDB.

Blandt disse teorier kan nævnes KRISCHER [21], der har opstillet følgende system:

Fugttransport:

$$\underbrace{\kappa \frac{\partial^2 \Gamma_w}{\partial z^2} - \frac{\partial \Gamma_w}{\partial t}}_{\text{væsketransp.}} + \underbrace{\frac{\delta^1}{\mu} \frac{\partial^2 \gamma_d}{\partial z^2} - \psi_L \frac{\partial \gamma_d}{\partial t}}_{\text{vanddamptransp.}} = 0$$

Varmetransport:

$$\underbrace{\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - c \Gamma \frac{\partial \theta}{\partial t}}_{\text{normal varmetransp.}} + \underbrace{r \left( \frac{\delta^1}{\mu} \frac{\partial^2 \gamma_d}{\partial z^2} - \psi_L \frac{\partial \gamma_d}{\partial t} \right)}_{\text{fordampning-kondensation}} = -q_E$$

Betegnelser og enheder, se KRISCHER.

Dette system findes løst for konstante værdier af transportkoefficienterne ved et stort manuelt arbejde.

Desuden har LYKOW [27] ud fra termodynamikken for irreversible processer udledt sammenhængende ligninger:

Fugttransport:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Varmetransport:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_e \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Betegnelser og enheder, se LYKOW.

Disse ligninger findes løst ved brug af rækkeudviklinger og dimensionsløse tal.

Desuden findes der teorier, der arbejder med 3 potentialer, nemlig fugtindhold, temperatur og totaltryk. Sådanne ligningssystemer findes opstillet af LYKOW [27], CLAESSON [8] og HARMATHY [17], [18]. Dette giver overordentlig komplicerede ligninger, f.eks.:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \lambda_{uu} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_{ut} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_{up} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_{tu} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_{tt} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_{tp} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \lambda_{pu} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_{pt} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_{pp} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

hvor  $\lambda$  er fugttransportkoefficienter (konstante i mindre intervaller)

Om løsning ud fra disse teorier må det generelt siges, at de kræver et nøje kendskab til materialets egenskaber, og at en bestemmelse af de indgående parametre så at sige ikke findes, idet man aldrig måler alle de variable i et forsøg. Dette medfører, at resultater af sådanne komplicerede beregninger kun har interesse, hvis de kan vise rimelig sammenhæng mellem forsøgsresultater og teoretiske beregninger. Dette er endnu ikke eftervist, og egne forsøg, som omtales senere, kan nok heller ikke give tilstrækkelige data til en kontrol. Af disse grunde bygger beskrivelsen af egne udtørningsforsøg på KRISCHERS teori for udtørring.

## 5.2. Forsøgsopstilling

Ved udtørningsforsøg er det nødvendigt at kende omgivelsernes temperatur- og fugtforhold, da disse har afgørende betydning for resultaterne. Ved en del af forsøgene har man valgt at foretage udtørringen i det lokale, hvor hele forsøgsopstillingen står. I dette tilfælde har man ingen større mulighed for at influere på forsøgsbetingelserne, men må nøjes med at måle dem under forsøget. Vil man sikre sig kontrol

med forsøgsbetingelserne, må man anvende klimaskabe, hvor temperatur og fugtighed kan holdes konstant. Vi har valgt at opbygge nogle forholdsvis enkle klimaskabe, som kan opfylde kravet om konstante forhold.

Princippet i klimaskabet (fig. 5.8) er: Luft fra lokalet blæses gennem et vandbad, hvorved luften bliver mættet med vanddamp, svarende til vandbadets temperatur. Derefter går luften gennem en varmeveksler og opvarmes svarende til den lufttemperatur, man ønsker. Denne klimatiserede luft blæses derefter forbi prøvelegemerne. Klimaskabet (fig. 5.9) består af varmeisolerede kasser med størrelsen 60·60·60 cm, hvor den nederste indeholder vandbadet, og i bunden af den øverste er varmeveksleren. Klimaskabet kan åbnes to steder (fig. 5.10), så man dels kan løfte låget og tage prøvelegemerne ind og ud og dels kontrollere væskemængden i vandbadet (destilleret vand).

Anvendelsen af luft fra omgivelserne til konditioneringen skyldes, at man derved ikke får totaltrykforskelle i systemet, hvilket vil opstå, hvis man til stadighed recirkulerer luften. Sådanne totaltrykforskelle vil påvirke den relative fugtighed, og et enkelt forsøg med recirkulation viste klart, at der kom kraftigt undertryk i en del af systemet.

Lufttilførsel sker ved brug af en støvsuger (Nilfisk), som tilføres 130 volt vekselstrøm. Anvendelsen af støvsugere som blæsere skyldes, at de indeholder en højtryksblæser og er billige og driftsikre. Med den angivne spænding på 130 volt vil støvsugeren yde ca.  $22 \text{ m}^3$  luft/time. Dette svarer i et klimatiseringskammer på  $0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \text{ m}$  til et luftskifte på ca. 175 gange pr. time. Dette er mange gange, men det er nødvendigt, hvis man vil udtørre prøvelegemer fra fuld vandmætning, uden at den relative fugtighed i kassen ændres mere end 1-2% på grund af fordampning fra prøvelegemerne.

Luften blæses ind i kassen og ned i et vandbad (fig. 5.11). Her kunne man bare lade det boble op, men det ville medføre alt for store bobler, der ikke ville få samme dugpunkt som

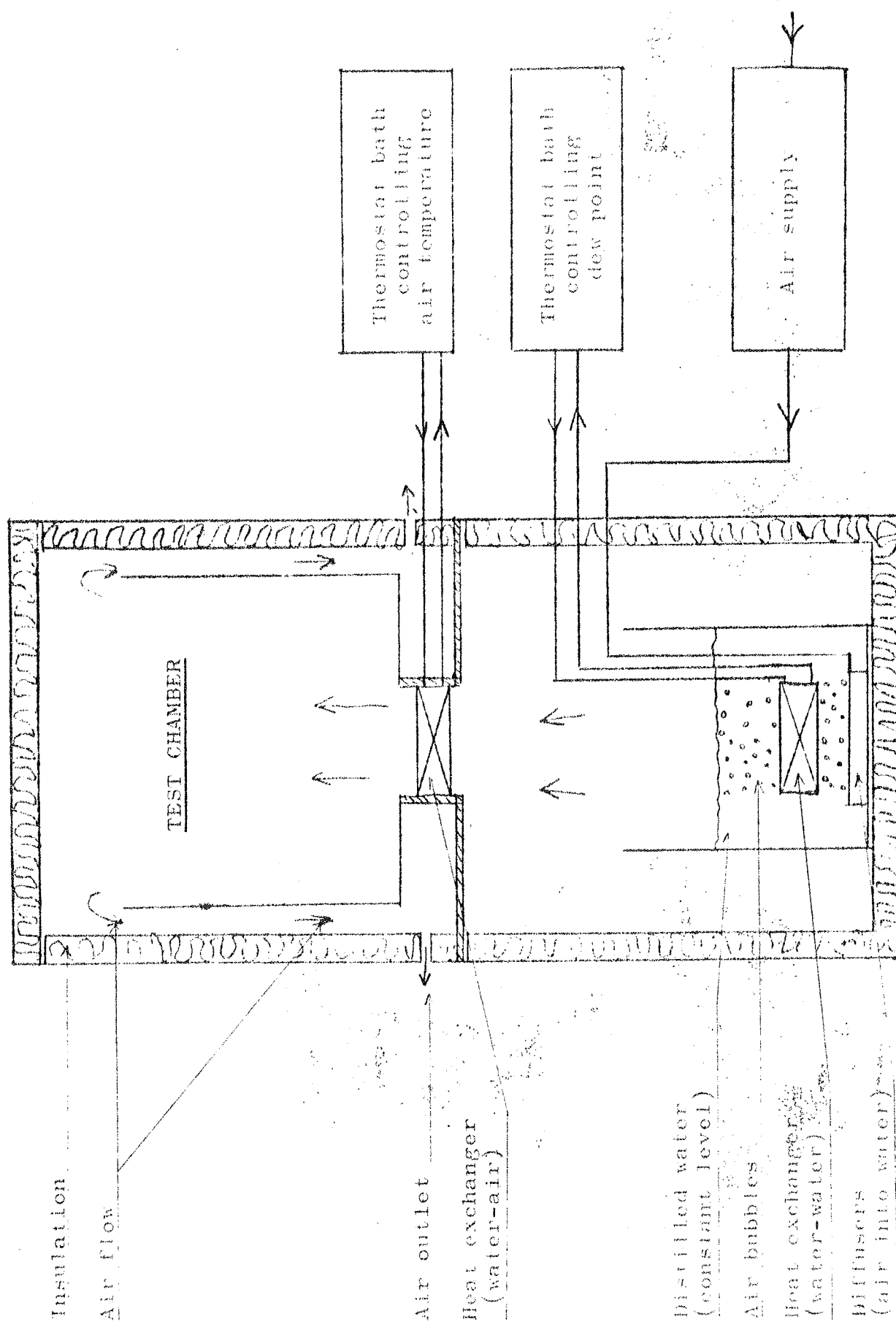
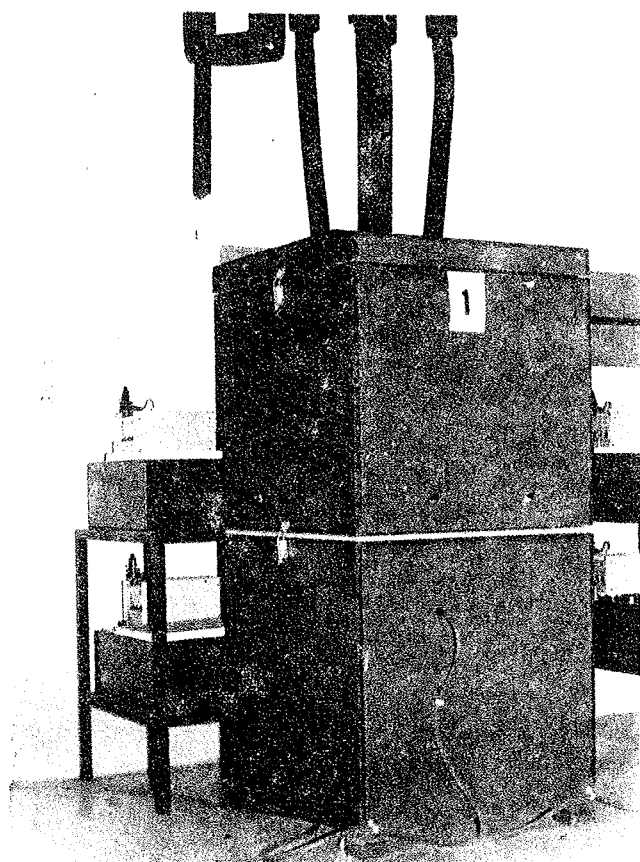


Fig. 5.8. Skitse af klimaskab.

Sketch of climate box.





kølevandsforsyning  
cooling water

test-kammer kasse med  
termostatbad for luft-  
temperatur

test chamber box with  
thermostat bath for air  
temperature

dugpunkt kasse med termo-  
statbad for dugpunkt

dew-point box with thermo-  
stat bath for dew-point

Fig. 5.9. Klimaskab  
Climate box

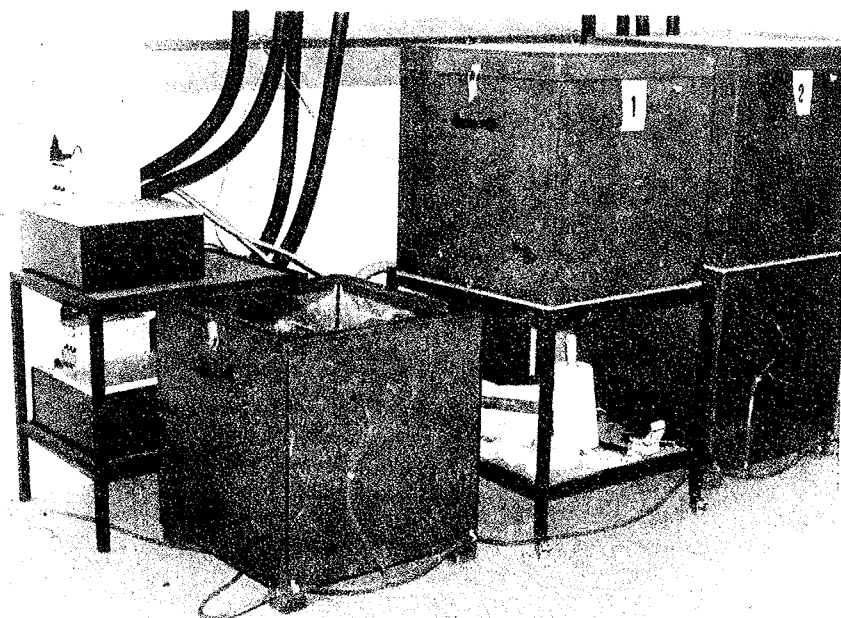


Fig. 5.10. Klimaskab åben for kontrol  
Climate box open for control

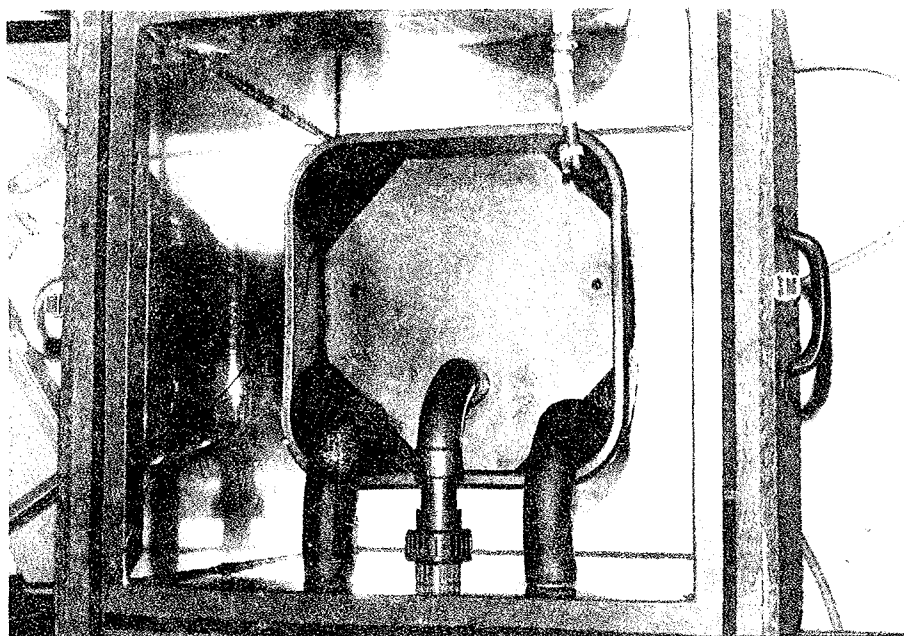


Fig. 5.11. Den nederste kasse med vand til styring af dugpunktet.

The lower box with water to control the dew point.

vandbadets temperatur. I stedet har man valgt at findele luftboblerne ved at sende luften ud gennem en æske forsynet med fine huller (ca. 1 mm). Dette medfører, at luftens dugpunkt bliver lig med eller meget nær ved vandbadets temperatur. Der er ved målinger ikke konstateret større afvigelser ved normale forhold end målenøjagtigheden, for den anvendte dugpunktsmåler  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Selv om der er en mindre afvigelse mellem dugpunktet i kassen og vandbadets temperatur, er det uden større betydning, hvis afvigelsen er konstant, hvilket den må siges at være.

Temperaturen af vandbadet styres af en varmeveksler, som holdes på en konstant temperatur fra en termostat (Heto). Termostatbadet kan efter opgivelse fra leverandoren i området fra  $5^\circ\text{C}$  til  $50^\circ\text{C}$  holde en temperatur inden for  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ . Da dugpunktet i klimaskabet normalt er under  $20^\circ\text{C}$ , er det nødvendigt at anvende køling til termostatbadet. Denne køling fås fra laboratoriets brinekøleanlæg.

Lufttemperaturen fås ved at blæse luften gennem en varmeveksler, hvorigennem der cirkuleres vand. Vandet holdes på en konstant temperatur ved et andet termostatbad. Når luften blæses gennem varmeveksleren, vil luftens temperatur nærme sig vandets afhængig af varmeovergangstal, lufthastighed og temperaturdifferens. Temperaturen og fugtigheden i lokalet, hvor klimaskabene står, varierer, og det er derfor nødvendigt at måle, om klimaskabene kan udligne disse svingninger. Til kontrol på konstans af klimaskabe er hver time blevet målt lufttemperaturen i det øverste testkammer samt vandbadets temperatur (dågpunktstemperaturen). Disse målinger foretages automatisk af en datalogger (fig. 5.12) og hules ud på papirstrimmel sammen med de øvrige temperatur-

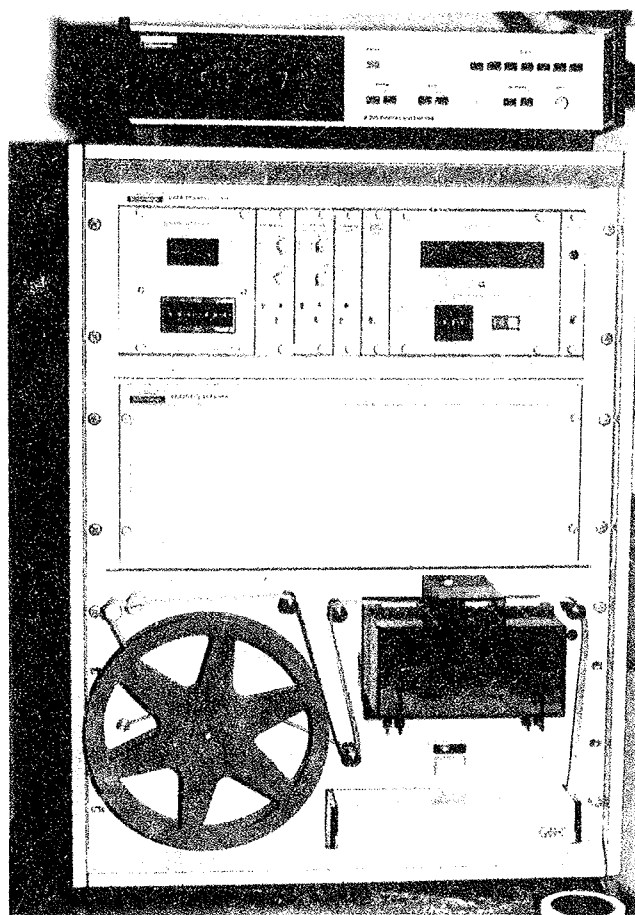


Fig. 5.12. 100-kanals datalogger med puncher.  
100-channel datalogger with puncher.

målinger. Disse data konverteres 1 gang i døgnet til hulkort via NEUCC. Dette medfører, at alle de originale måledata findes på hulkort. En beskrivelse af format af disse hulkort og nogle EDB-programmer til bearbejdning af resultaterne (f.eks. optegning) findes i et appendix til denne afhandling. Som tidsmåler anvendes en timetæller med 0 h ved forsøgenes start. Ud fra denne timetæller fås den eksperimentelle tid i timer, som giver tidsregningen under samtlige forsøg.

På fig. 6.10 ses temperatur og dugpunkt i lokalet optegnet med EDB fra originale data, og på fig. 6.11 ses temperatur og dugpunkt i et klimaskab i samme periode. Figurerne viser meget klart, at svingning i lokalets hygrotermiske forhold ingen betydning har for klimaskabenes funktion. En meget væsentlig ting er, at afbrydelser af laboratoriets brinekøleanlæg ses tydeligt som temperaturstigninger på optegningen. Dette samt el-stop må derfor undgås, men sådanne uheld findes med mellemrum i målingerne, hvilket er meget uheldigt, når der som her er tale om langvarige forsøg.

Før hvert udtørningsforsøg er prøvelegemerne blevet mere eller mindre vandmættet. Hvis de anbringes i vand, vil de i løbet af 1 døgn nå over 30% vol i fugtindhold. Vil man højere op, må man enten vente meget længe, eller man må anbringe dem under vand i vakuum. Vi har her anvendt en eccicator, se fig. 5.13. Når der sættes vakuum på, vil luften forsøge at slippe ud, og på denne måde er det muligt at opnå næsten total vandmætning, ca. 75% vol. De 75% svarer også ret nøje til porøsiteten for gasbeton.

For alle forsøg gælder, at der er tale om endimensional udtørring, idet bund og sider af prøvelegemerne er beklædt med diffusionstæt folie.

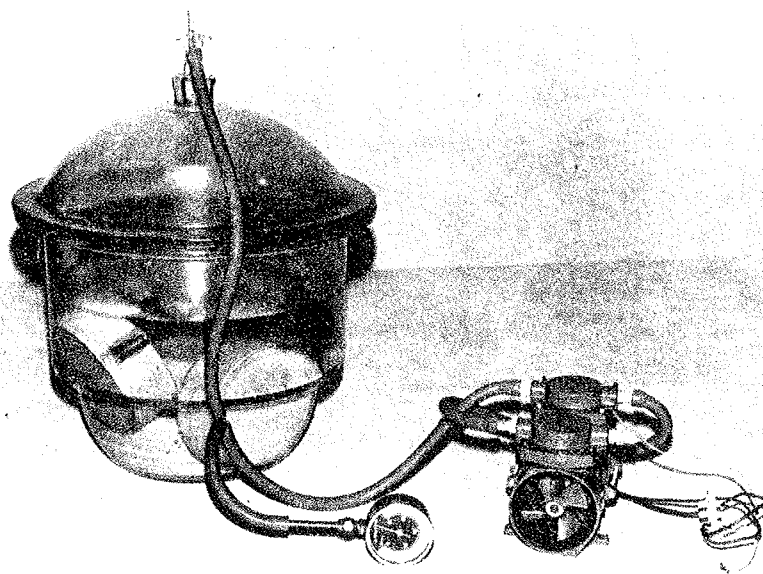


Fig. 5.13. Eiccicator med prøvelegemer i vand samt vacuumpumpe.

Eiccicator with specimen in water and vacuum air pump.

### 5.3. Forsøgsresultater

Alle måleresultater findes på hukort. Dette gælder både temperatur- og fugtfordelinger. Denne form for lagring af resultaterne giver store lettelser i bearbejdningen, idet der kan anvendes plotter til udtegnning af resultaterne. Dette vil også klart fremgå af de følgende afsnit.

I det følgende vil nogle af de udførte forsøg blive gennemgået. Ved omtalen af det første forsøg vil bearbejdningsmetoderne tillige blive gennemgået.

#### 5.3.1. Udtørring af prøvelegeme nr. 197

Prøvelegeme nr. 197.

Rumvægt	$568,9 \text{ kg/m}^3$	højde	50,3 mm
---------	------------------------	-------	---------

$\rho$ (rumvægt)	$3,8 \text{ kg/m}^3$	diameter	121,3 mm
------------------	----------------------	----------	----------

max. vandindhold  $\sim 78\%$  vol

Forsøget er startet fra vandmættet tilstand, ca. 78% vol. Der er foretaget målinger af fugtfordelinger til forskellige tidspunkter ved brug af  $\gamma$ -transmissionsmåleudstyret samt vejninger af middelfugtindholdet. Udtørringen er udført i kelderlokalet med ventilation ca. 1,5 m/sek. Temperatur (ca. 23°C) og fugtighed i lokalet (dugpunkt 13°C-7°C) under forsøget er målt, se fig. 5.14.

Ud fra vejningerne er udtørningshastigheden beregnet (fig. 5.15). Det første knæpunkt ved overgang fra væske til væske- og diffusionstransport er ikke særligt godt defineret, men skønnes at ligge ved ca. 22% vol. Variationerne i udtørningshastigheden, som ses på fig. 5.15, skyldes delvis variationer i lokalets temperatur og fugtighed, men også at fugtovergangstallet varierer. Den relativt lave udtørningshastighed mellem 20% og 25% må forklares ud fra det højere dugpunkt, som fremgår af fig. 5.14.

Fugtfordelingerne, der er målt under forsøget, ses på fig. 5.16, hvor den lodrette akse angiver fugtindholdet i % vol, og den vandrette angiver afstanden fra den diffusionstøtte endeflade til den åbne i cm. De målte punkter er på tegningen angivet med forskellige symboler (et for hvert tidspunkt). Til højre for tegningen er angivet symbolerne og de tilsvarende tidspunkter i timer.

Ved brug af regressionsanalyse er for hvert tidspunkt beregnet den bedste tilnærmelse for fugtfordelingen, udtrykt som 2 parabler med et fælles punkt, hvor hældningskoefficienten er den samme. Denne beregning er udført ved brug af EDB. De resulterende parabler findes optegnet som fuldt optrukne linier på figuren. Det ses, at i de fleste tilfælde bliver tilnærmelsen ret god, når man tager hensyn til, at målepunkterne hver for sig er belastet med en statistisk usikkerhed fra  $\gamma$ -transmissionsmålingerne. Når der er brugt parabler, hænger det sammen med, at man teoretisk kan beregne, at for et konstant kapillarledningstal vil fugtfordelingerne være parabler (KRISCHER [21], LYKOW [26]). Anvendelsen af matematiske udtryk for fugtfordelingen er en væsentlig fordel, når kapillar-

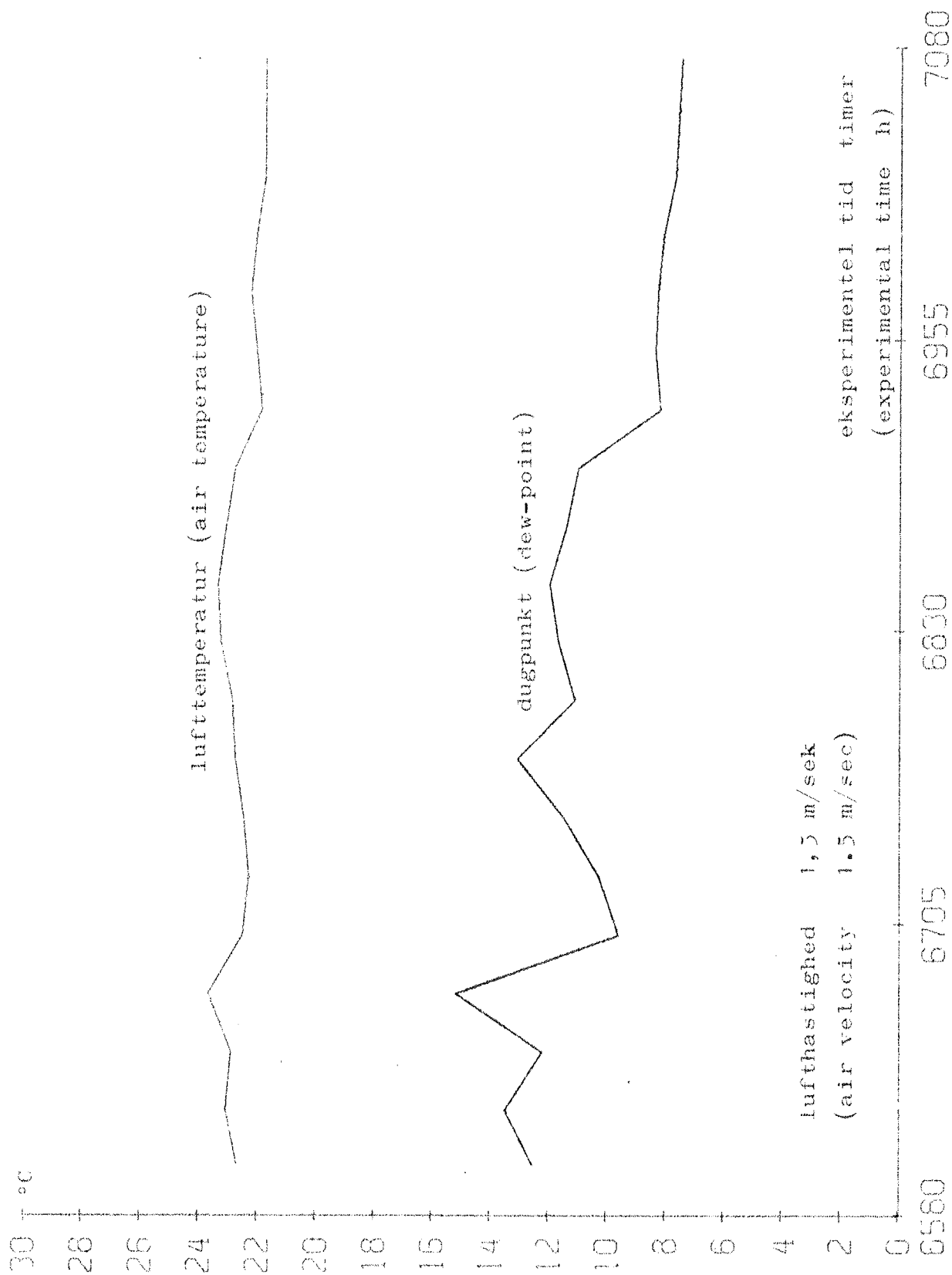


Fig. 5.14. Variationerne i lufttemperatur og dugpunkt i lokalet, hvor udtørringen af prøvelegeme nr. 198 skete.

Variations in air temperature and dew-point in the room where the drying out of specimen no. 198 took place.

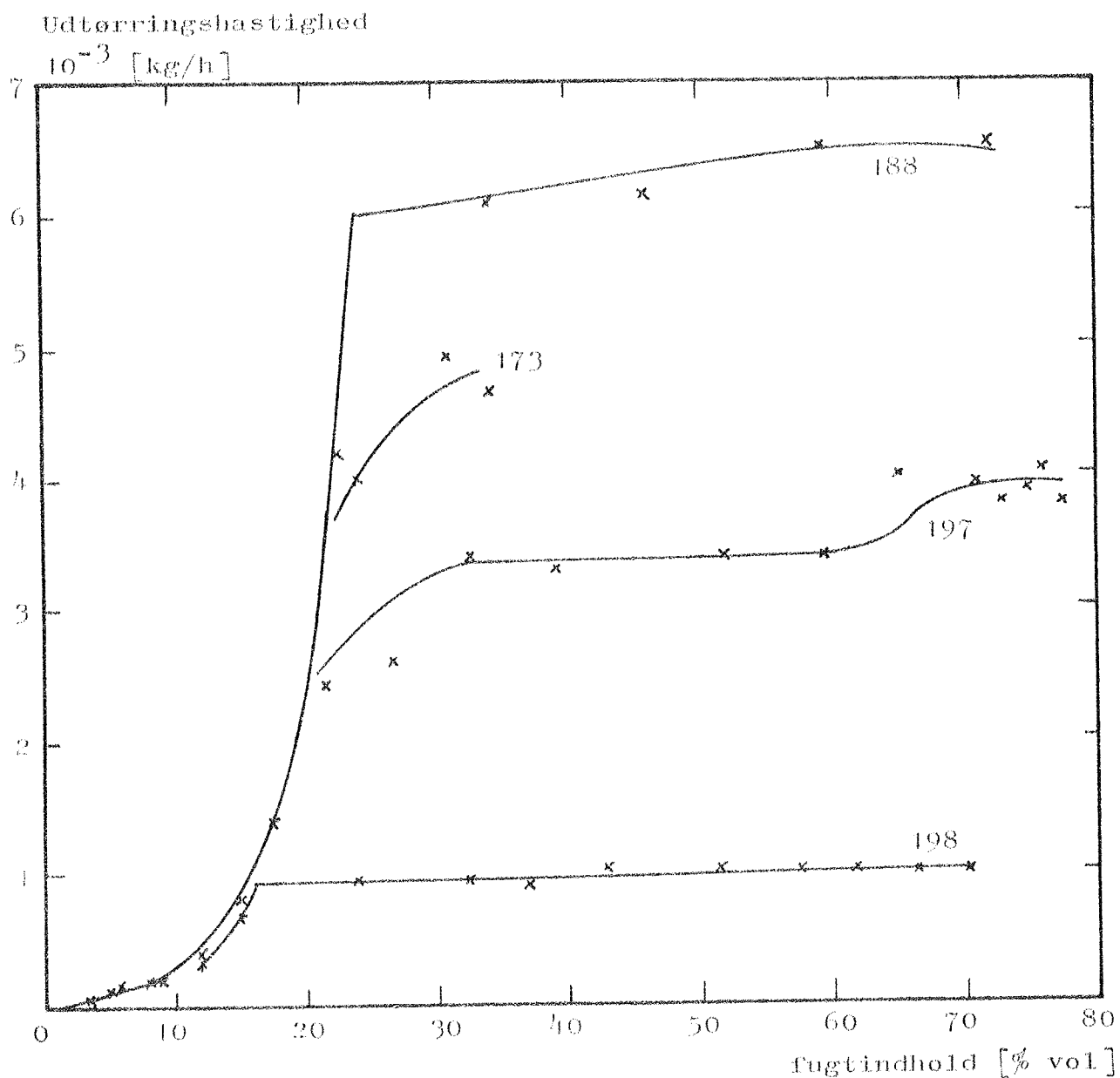


Fig. 5.15. Udtørningshastigheden som funktion af fugtindholdet for eksperiment med prøvelegeme nr. 173, 188, 197, 198.  
 Drying-out rate versus moisture content for the experiments with specimens no. 173, 188, 197 and 198.



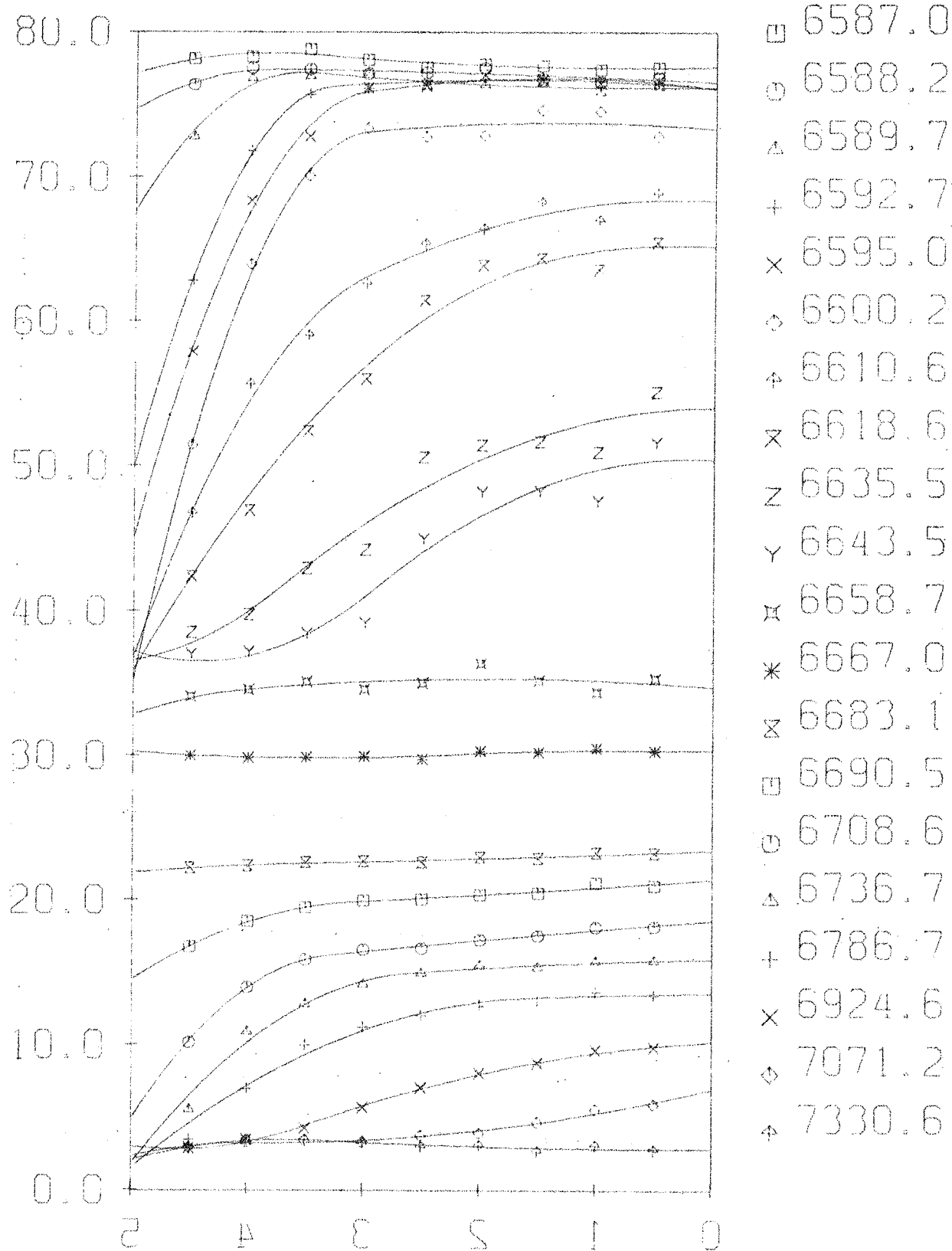


Fig.5.16. Fugtfordeling i prøvelegeme nr.197 under udtørring. Fugtindhold (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side. Til højre symbolerne for de målte værdier og tilhørende eksperimentel tid (timer).

Moisture distribution in specimen no.197 during drying experiment. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side. To the right the symbols of the measured values at the experimental time (hours).

ledningstallet skal beregnes, idet beregningen så kan ske automatisk. Det må bemærkes, at de tilnærmede fugtfordelinger giver en udjævning af de lokale variationer, f.eks. ved målingerne ved 1 cm til 6610.6, 6618.6, 6635.5 og 6643.5 h, hvor den målte værdi i alle tilfælde ligger under den beregnede fordeling. Dette kan ikke være en ren tilfældighed, men må skyldes variationer i materialets porestruktur på dette sted. De fugtfordelinger, man optegner, skulle gerne være en ren afspejling af materialets makroskopiske egenskaber, og det kan kun lade sig gøre, hvis materialet er homogent, og hvis hysteresen er ens i hele materialet (alle dele har haft nøjagtig samme variationer i fugtindhold og temperatur i prøvestykkets levetid). Dette er krav, som er praktisk taget umulige at opfylde for et byggemateriale. Disse forsøg er heller ikke uden fejl.

Vi vil derefter gå over til at se på fugtfordelingerne. Ved udtørringens start er fugtindholdet næsten konstant i prøvelegemet, 78% vol. Derefter falder fugtindholdet til ca. 35% vol, hvor der igen er konstant fugtindhold. Herved deles udtørringen i 3 adskilte områder: 75-35% vol, 35-25% vol og 25-3% vol.

I første del, som må anses for ren væsketransport, sker udtørringen først og fremmest fra prøvelegemets overflade, hvis fugtindhold falder hurtigt. Dernæst følger de indre dele af prøvelegemet med.

Fra ca. 35% vol er fugtindholdet næsten konstant gennem hele prøvelegemet, og det opretholdes ned til ca. 22% vol. Det må skyldes, at fugttransporten i væskeform i dette område netop kan følge med fordampningen. Ud fra BOMBERG's suctionskurve (fig. 3.5) fås, at 35% vol fugt svarer til  $p_{suc} = 10^4 \text{ N/m}^2$ , og 22% vol til  $p_{suc} = 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ . Ud fra disse tal kan poreradien beregnes til:  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  (35% vol), henholdsvis  $7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  (22% vol). Sammenlignes disse værdier med kapillarfordelingskurven for gasbeton (afsnit 3.4), vil man bemærke, at dette er et område med få porer.

En foreløbig forklaring på udtørringens forløb ud fra kapillarfordelingen er: Når udtørringen starter, tømmes de store porer  $r \geq 10^{-5} \text{ m}$ , hvorved fugtindholdet når de ca. 35% vol. Fra dette punkt og ned til ca. 22% vol. er der meget få porer, og udtørringen sker derfor mest som en afgivelse af adsorberet væske fra de indvendige overflader. Dette vil kunne medføre, at fugtindholdet er konstant i hele prøven. Først i det øjeblik man når ned under 22% vol., er det igen tømming af porer, der får betydning, og samtidigt overgår transporten fra en ren væsketransport til en kombineret transport med diffusion ved overfladen og væsketransport inde i materialet. At der er væsketransport ned til dette niveau, passer også godt til sorptionskurven, hvor 98% RF svarer til ca. 11% vol.

I sidste del af udtørringen fra 22% vol. og ned til ligevægts-tilstanden sker transporten langsommere, idet diffusionen begynder at gøre sig gældende. Udtørringen i det yderste lag sker hurtigt, hvorved man når ned på hygroskopiske fugtindhold, mens resten langsomt følger efter. Det ses på fig. 5.16, at de tilnærmede kurver i dette område stemmer meget fint med de målte resultater.

På fig. 5.17 ses det samme udtørringsforsøg tegnet i en anden form med fugtindhold i vol% ud ad y-aksen og tiden ud ad x-aksen i timer. Der er mellem de målte punkter tegnet rette linier, en for hver af de 9 højder, der er målt på i prøvelegemet. Det ses af denne afbildning, at der i starten af udtørringen er tale om et overgangsområde ( $\sim 76\%$  vol.), mens første del ellers viser, at udtørringshastigheden (hældningen af linierne) er størst i overfladen og mindst imod den lukkede flade. Det ses desuden tydeligt, at kurverne samler sig igen ved ca. 34% vol, og at de indtil 24% vol ligger tæt samlede, svarende til konstant fugtindhold gennem prøvelegemet. Under 24% vol ses fugtfordelingerne for de enkelte lag med det yderste lag afbildet nederst, hvor det hygroskopiske fugtindhold nås først. Udtørringsforløbene for de enkelte lag nærmer sig parabelform i dette sidste område.

SPECIMEN NUMBER =

197

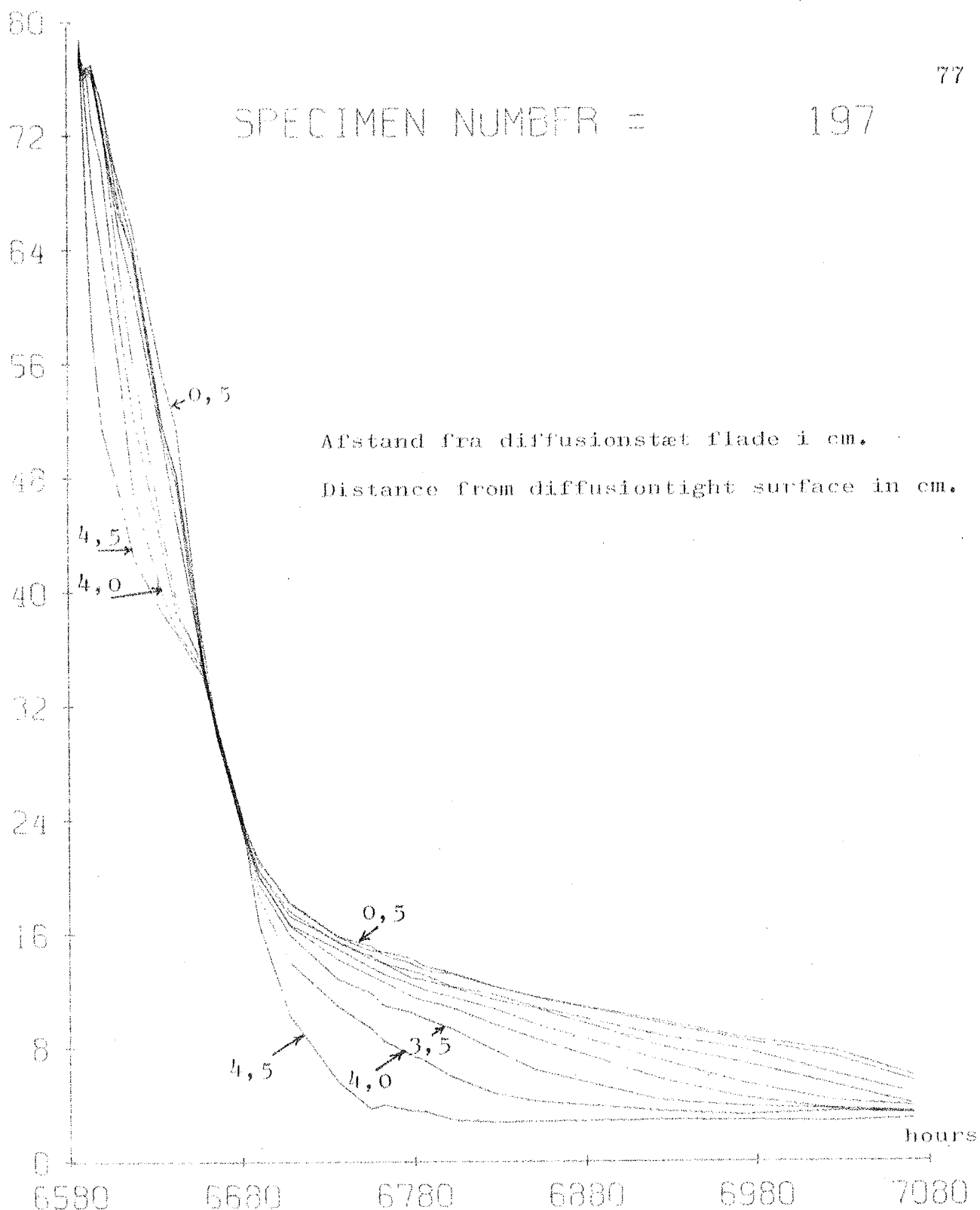


Fig. 5.17. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 197 under udtørningsforsøg. Fugtindholdet (%vol) i afhængighed af den eksperimentelle tid (timer). Kurverne er blevet plottet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Moisture distributions in specimen no. 197 during drying experiment. Moisture content (%vol) versus experimental time (hours). The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

### 5.3.1.1. Beregning af kapillarledningstallet

I første omgang blev kapillarledningstallet beregnet ud fra de tilnærmede fugtfordelinger (parabler ud fra de målte fugtindhold) ved brug af formlen

$$D = \frac{g}{\rho \text{ grad } \psi}$$

og to på hinanden følgende fugtfordelinger, f.eks. mellem 6335,5 h og 6643,5 h. Da fugtfordelingerne er kontinuerte, er værdierne af  $g$  og  $\text{grad } \psi$  også kontinuerte inden for prøvelegemet (0-5 cm), og  $D = D(\psi)$  kan derfor beregnes som en kontinuert funktion mellem det maksimale og det minimale middelfugtindhold for det udvalgte sæt fordelinger. Derved fås nogle kurvestykker af  $D = D(\psi)$  defineret, som kan optegnes automatisk ved brug af EDB. Antallet af kurvestykker vil afhænge af antallet af fugtfordelinger. Resultatet fremgår af fig. 5.18, der ud ad x-aksen har fugtindholdet i % vol., og ud ad y-aksen har en logaritmisk skala med kapillarledningstallet i  $\text{m}^2/\text{h}$  varierende fra  $10^{-6}$  til  $10^{-3}$ .

De optegnede kurver ser meget forvirrende ud uden nogen klar tendens til en entydig afhængighed for kapillarledningstallet.

$D = D(\psi)$ . Beregningen af kapillarledningstallet (fig. 5.5) kan kun foretages på fugtfordelinger, hvor fugtindholdet er stadigt faldende fra den lukkede til den åbne flade. Dette er ikke altid tilfældet for de målte fugtfordelinger, og når det sker, vil EDB-programmet beregne et negativt kapillarledningstal. Disse værdier må selvfølgelig kasseres, og det sker ved i optegningen at fastlægge, at kapillarledningstallet aldrig kan være mindre end  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ . Herfra fremkommer der i optegningen nogle lodrette linier fra det sidste punkt, hvor det "normale" kapillarledningstal er defineret til undergrænsen. Disse lodrette linier må man altså se bort fra. I beregningen indgår, som det fremgår af fig. 5.5, et areal og middelværdier for hældningskoefficienten og fugtindholdet. Når disse forhold tages over længere tidsintervaller, f.eks. 8 timer, er det beregnede kapillarledningstal ikke nødvendig-

# WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 197

CARD TYPE = 27

79

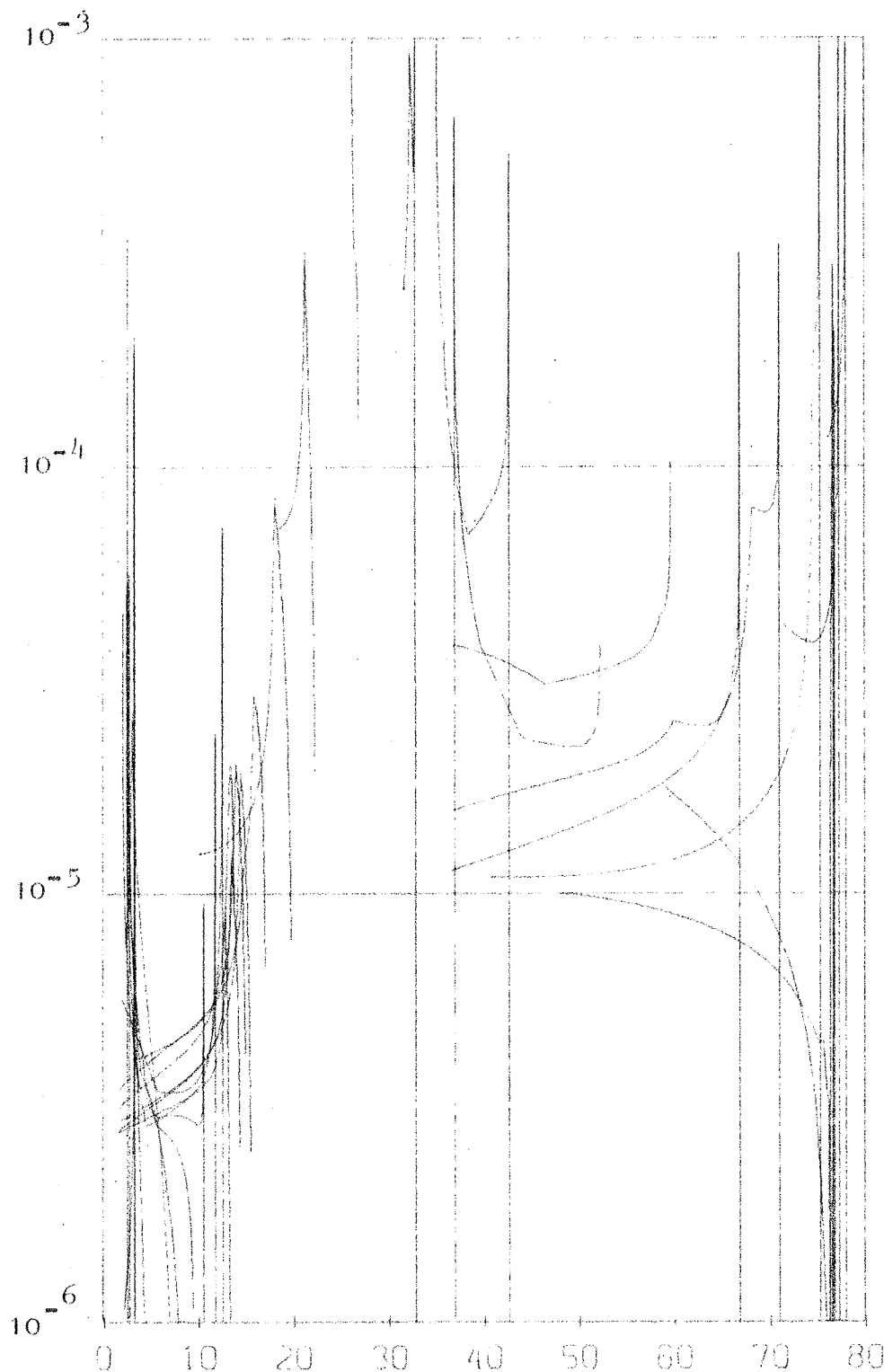


Fig.5.18. Kapillarledningstallet beregnet for udtørring (fig.5.16) på prøvelegeme nr.197. Kapillarledningstallet (m<sup>2</sup>/h) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment (fig.5.16) on specimen no.197. Diffusivity (m<sup>2</sup>/h) (log-scale) versus moisture content (%vol).

vis korrekt, da kapillarledningstallet varierer meget med fugtindholdet.

For at skaffe bedre resultater må man kende fugtfordelingerne med kortere tidsintervaller. Dette kan gøres på 2 måder, enten ved målinger hver time eller ved en teoretisk beregning af fugtfordelingerne mellem de målte. Den første metode kræver automatiske målinger (denne metode vil blive opbygget i 1974). Den anden metode er den eneste løsning, hvis man vil udnytte de målinger, der er foretaget. For et kortere tidsrum (her 6586,5 h - 6654,0 h) er fugtindholdene i hvert enkelt lag faldende i noget, der svarer til parabler. Ved brug af mindste kvadraters metode findes de parabler, der passer bedst for hvert lag. Med de tidsintervaller man ønsker det, kan man nu beregne fugtindholdet i hvert lag. Det er gjort med 1,5 timers spring, og hver tredje fugtfordeling er udtegnet på fig. 5.19. Disse beregnede punkter er de med symboler markerede, og ud fra dem beregnes nu, på samme måde som fra de målte fugtindhold, nogle fugtfordelinger. At tilnærmelsen er rimelig, kan ses ved sammenligning mellem de virkelige, målte fordelinger (fig. 5.16) og de teoretiske (fig. 5.19). Kurverne har næsten den samme form, undtagen lige ved starten.

Beregnes kapillarledningstallet nu ud fra disse fugtfordelinger, fås en variation af kapillarledningstallet, som fremgår af fig. 5.20. Hvis man ser bort fra de lodrette linier, som skyldes, at fugtgradienten skifter fortegn, som omtalt tidligere, er der ud fra kurvestykkerne defineret et område, der indeholder alle de beregnede kapillarledningstal. Formen på området viser, at kapillarledningstallet har sin maksimale værdi ved starten (75% vol), og derefter fås et minimum ved 60% vol og atter en stigning mod zonen med det konstante fugtindhold (35-25% vol). Områdets størrelse er dels et udtryk for statistiske variationer og dels, at kapillarledningstallet ikke er ens i hele prøvestykkets tykkelse. For at vise, hvor store forskelle der fås, hvis der kun medtages resultater for et enkelt lag, er kapillarledningstallet beregnet for

SPECIMEN NUMBER =

197

CARD TYPE

24

81

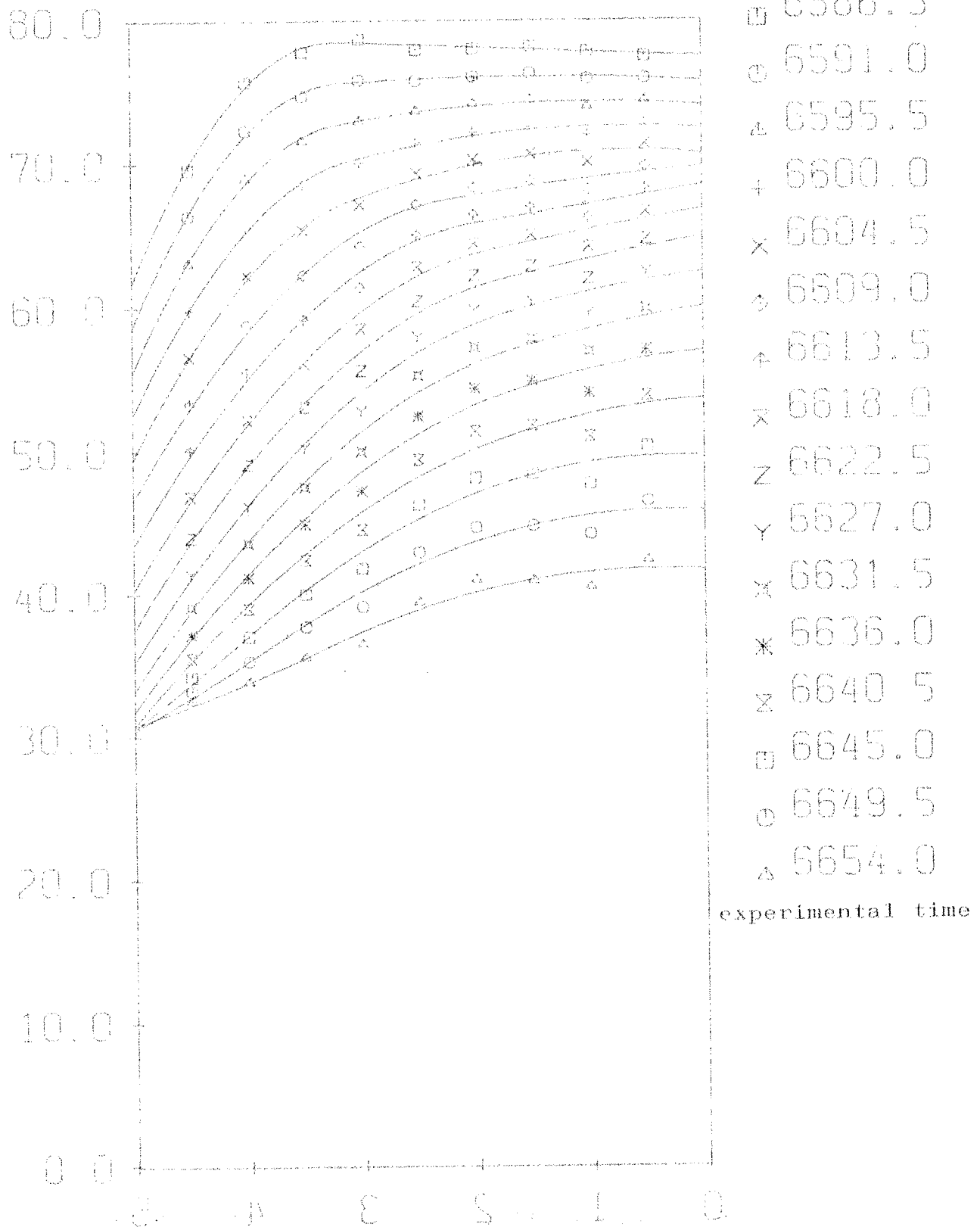


Fig.5.19. Fugtfordelinger beregnet ud fra målte Fugtindhold ved regression. Fugtindhold (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side.

Moisture distribution calculated from measured moisture contents by polynomial regression. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side.



## WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 197

CARD TYPE = 27

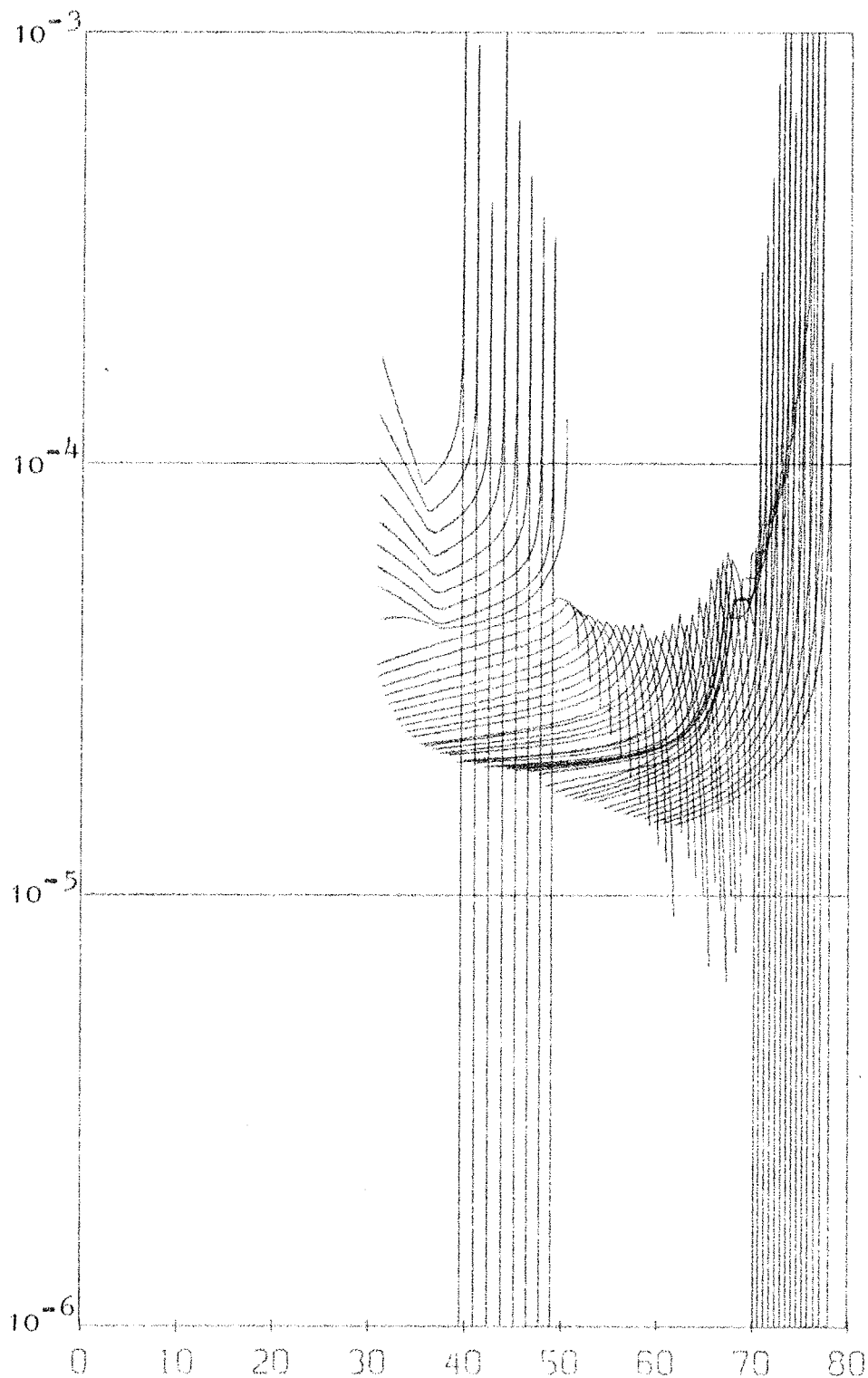


Fig. 5.20. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøg. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment. Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content (%vol).

# WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 197  
CARD TYPE = 27

83

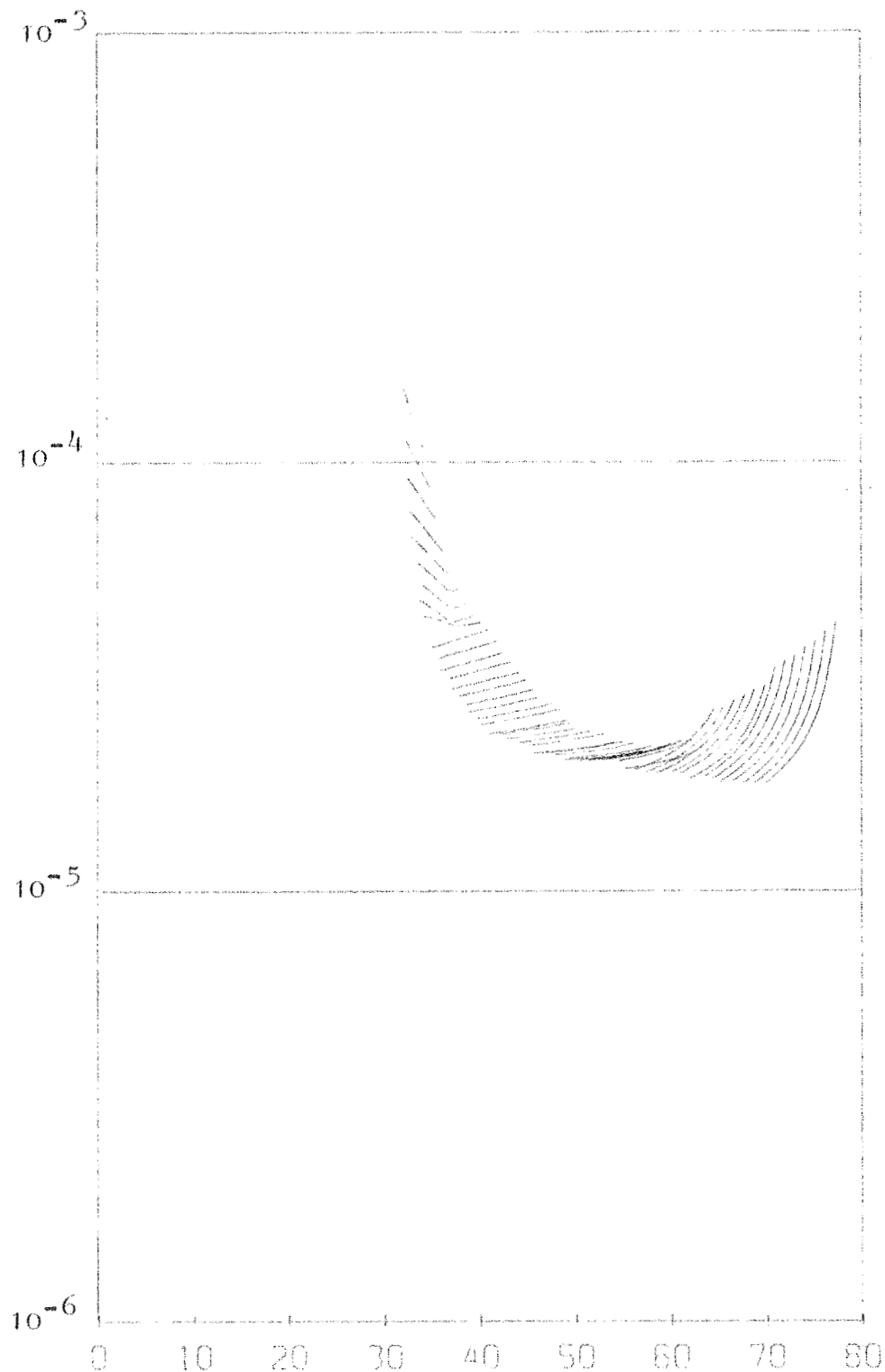


Fig.5.21. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøgen for laget 5-15 mm fra den lukkede side. Kapillarledningstallet (m<sup>2</sup>/h) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment for the layer between 5 and 15 mm from the closed side. Diffusivity (m<sup>2</sup>/h) (log-scale) versus moisture content (%vol).

# WATER DIFFUSIVITY

84

SPECIMEN NUMBER = 197

CARD TYPE = 27

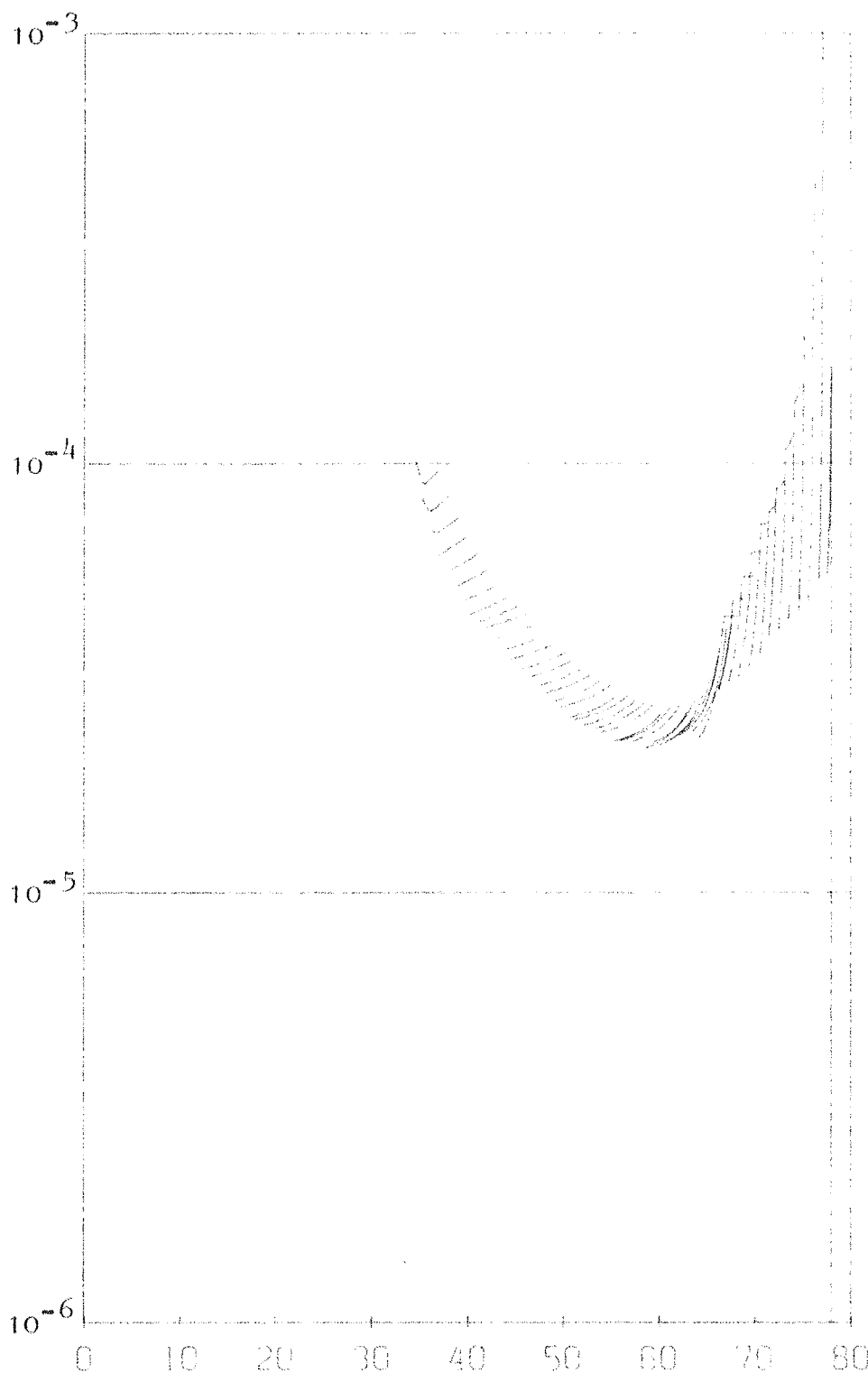


Fig.5.22. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøget inden for laget 15-25 mm fra den lukkede side. Kapillarledningstallet (m<sup>2</sup>/h) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment for the layer between 15 and 25 mm from the closed side. Diffusivity (m<sup>2</sup>/h) (log-scale) versus moisture content (%vol).

# WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 197

85

CARD TYPE = 27

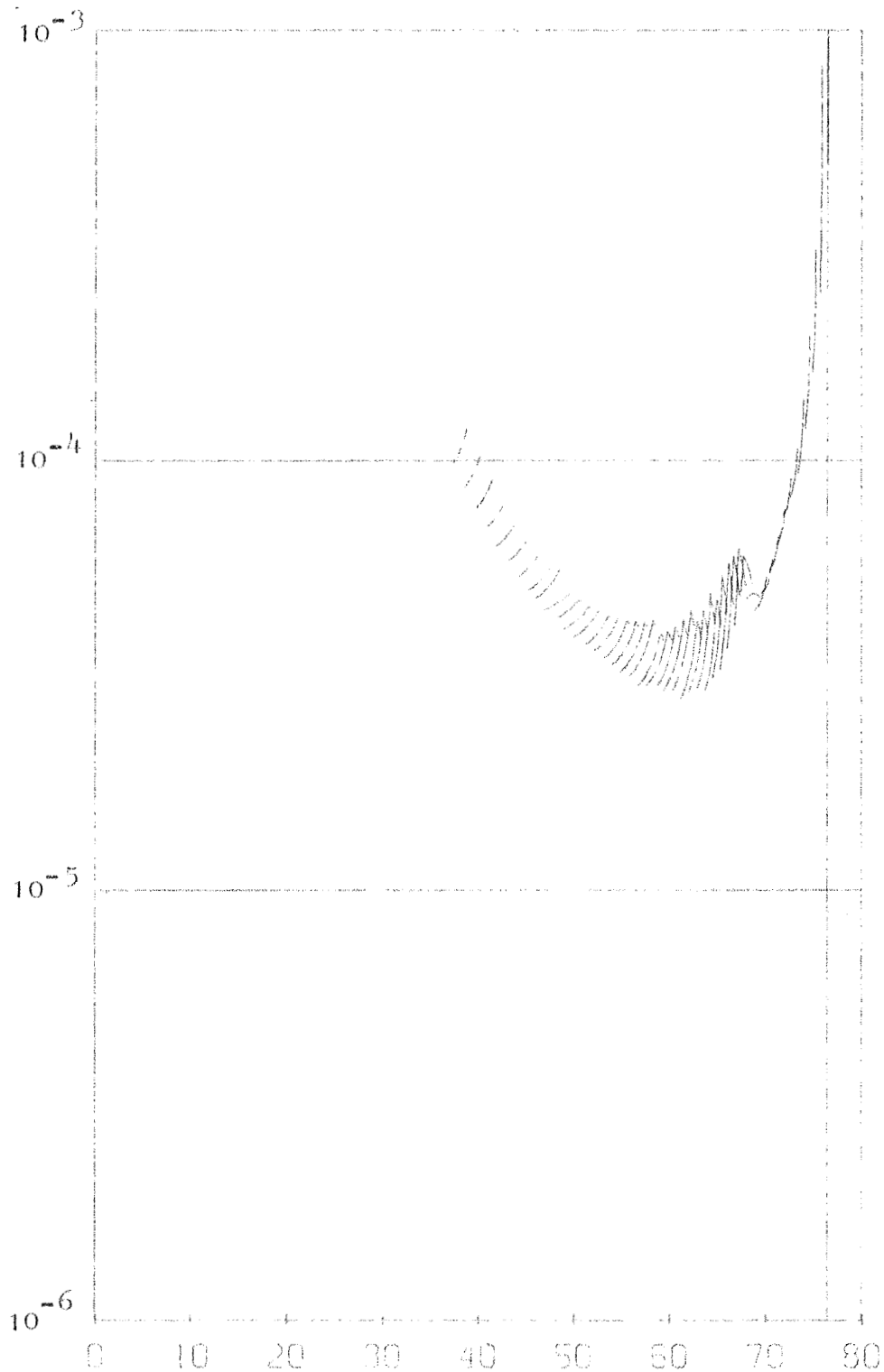


Fig.5.23. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøget inden for laget 25-35 mm fra den lukkede side. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment for the layer between 25 and 35 mm from the closed side. Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content (%vol).

## WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 197

CARD TYPE = 27

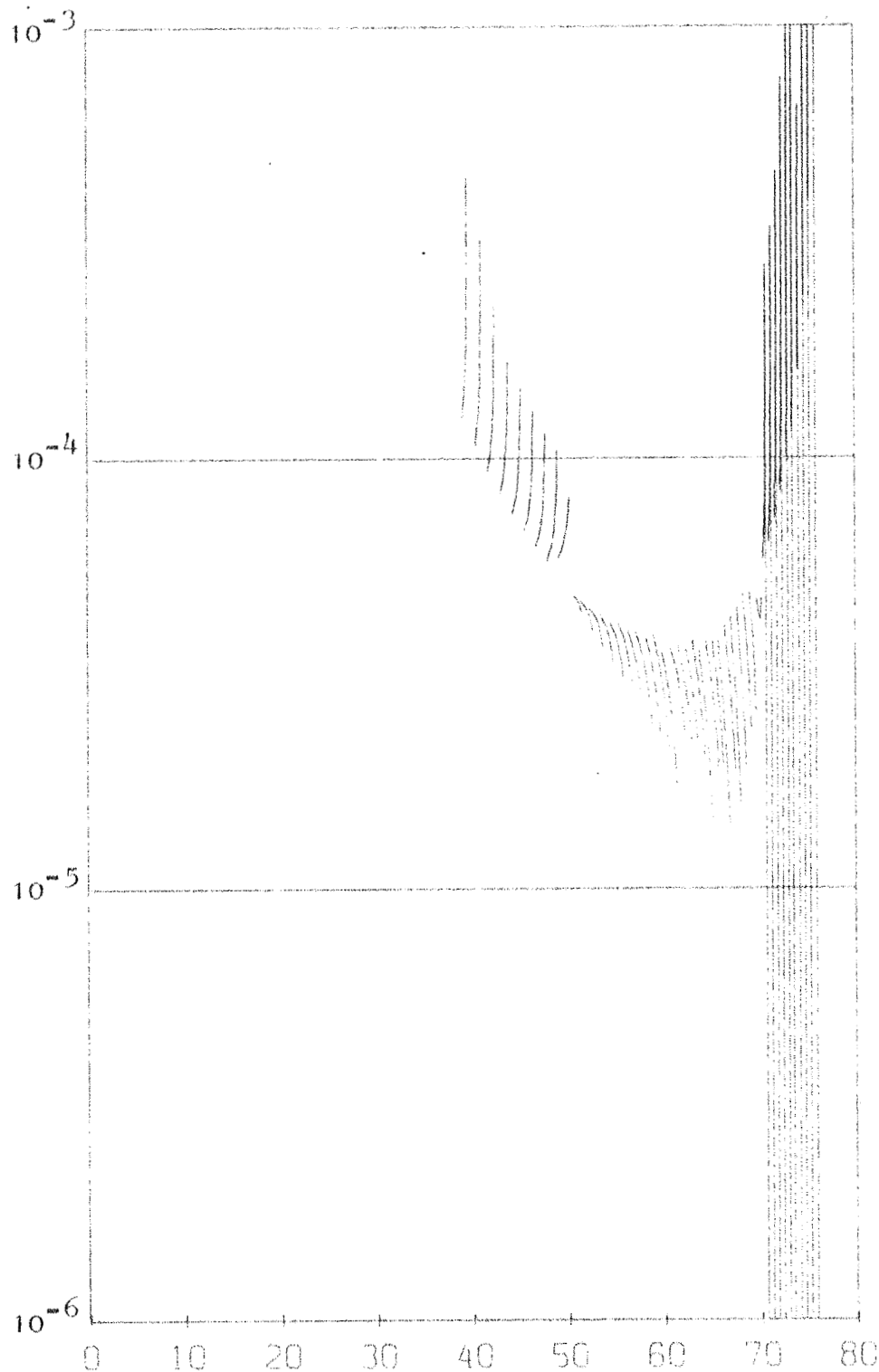


Fig.5.24. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøget inden for laget 35-45 mm fra den lukkede side. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet ( $\% \text{vol}$ ).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment for the layer between 35 and 45 mm from the closed side. Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content ( $\% \text{vol}$ ).

4 lag . Fig. 5.21 viser resultater for 5-15 mm fra den åbne overflade. Fig. 5.22 viser resultater for 15-25 mm. I dette tilfælde ses første gang en lodret linie, der fås ved beregning af kapillarledningstallet omkring tiden 6580. h. Sammenlignes med fugtfordelingerne på fig. 5.19, vil man bemærke, at gradienten i fugtindholdet netop skifter fortegn i dette lag ca. 20 mm fra den åbne overflade. Fig. 5.23 viser beregningen for laget 25-35 mm fra den åbne overflade. Fig. 5.24 viser beregningen for laget 35-45 mm fra den åbne overflade. Her ses en række lodrette linier, som netop skyldes, at fugtindholdet falder ind imod den lukkede flade. På fig. 5.19 kan man se, at dette forsvinder, når man kommer under ca. 70% vol. Det stemmer med optegningen af kapillarledningstallene (fig. 5.24).

Det ses af figurerne, at kapillarledningstallet i alle tilfælde har et minimum omkring 50-60% vol, men den numeriske værdi af kapillarledningstallet er ikke den samme. Disse variationer i kapillarledningstallet fra lag til lag kan skyldes inhomogeniteter i prøvelegemets porestruktur, eller at afstanden fra laget til den åbne overflade, hvor udtørringen finder sted, influerer på resultaterne. Denne indflydelse kunne være, at kapillarledningstallet også var en funktion af fugtgradienten, d.v.s.  $D = D(\psi, \frac{\partial \psi}{\partial x})$ .

For det oprindeligt målte område 35-25%, hvor fugtindholdet var så godt som konstant, er det ikke muligt at definere fugtfordelinger med tættere tidsintervaller, idet der er for få målinger. Beregningen af kapillarledningstallet kræver desuden, at grad  $\psi$  ikke er 0. I dette tilfælde er grad  $\psi \sim 0$ , og  $D$  vil derfor ved beregning  $\Rightarrow \infty$ .

En beregning af kapillarledningstallet i området fra 25% vol til ligevægt kan ses på fig. 5.18, der giver en nærmest ret linie fra 22% vol ( $10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ ) til 10% vol ( $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ ). Resultatet kan dog forbedres, hvis der anvendes noget mindre tidsintervaller. I dette område er kapillarledningstallet ikke udtryk for en ren væsketransport, idet diffusionen får en væsentlig betydning. I dette område kan termodiffusionen få indflydelse, som tagkondensforsøgene senere vil vise.

### 5.3.2. Udtørring af prøvelegeme nr. 198.

Forsøget er startet med et vandmættet prøvelegeme ( $\sim 76\%$  vol), og derefter er udtørringen foretaget i et klimaskab. Heri var temperaturen  $22,5^{\circ}\text{C}$ , dugpunktet ca.  $7^{\circ}\text{C}$  og lufthastigheden ca.  $0,1\text{ m/sek}$ . Variationerne i temperatur og dugpunkt fremgår af fig. 5.25. Der ses en kraftig temperaturstigning omkring 5790 h, idet der opstod fejl i laboratoriets brinekøleanlæg. Udtørningshastigheden (fig. 5.14) for dette tilfælde er ca.  $1\text{ g/h}$  i første fase af udtørringen, og dermed ca. en fjerdedel af hastigheden ved udtørringen af prøvelegeme nr. 197.

De målte fugtfordelinger ses på fig. 5.26, der viser den samme inddeling i 3 faser som omtalt tidligere. Fugtfordelingen ved starten viser et maksimum omkring  $4\text{ cm}$  fra den lukkede flade. Dette maksimum findes igen i fugtfordelingerne ved  $30\text{--}40\%$  vol som følge af hysteresese.

Ved brug af teoretisk beregnede fugtfordelinger med spring på  $1,5\text{ time}$  er kapillarledningstallet beregnet (fig. 5.27). Det man først bemærker er, at resultaterne udviser en stor spredning, men samtidig er der en tendens til et minimum ved  $55\%$  vol, som det tidligere forsøg viste. Når resultaterne viser så stor spredning, er det formodentlig på grund af hysteresen, som medfører, at fugtgradienten skifter fortegn ved flere fugtfordelinger. Det er desuden sandsynligt, at udtørningshastigheden indfluerer på resultatet. Det er muligt, at en anvendelse af begrebet "relativ mætningsgrad" (BOMBERG [6]) kan mindske spredningen på kapillarledningstallet.

Dette forsøg er medtaget for at vise, at selv om fugtgradienten skifter fortegn, giver en beregning af kapillarledningstallet sandsynlige værdier. Det må altså undgås uden videre at kassere målinger, som ikke umiddelbart passer til teorien.

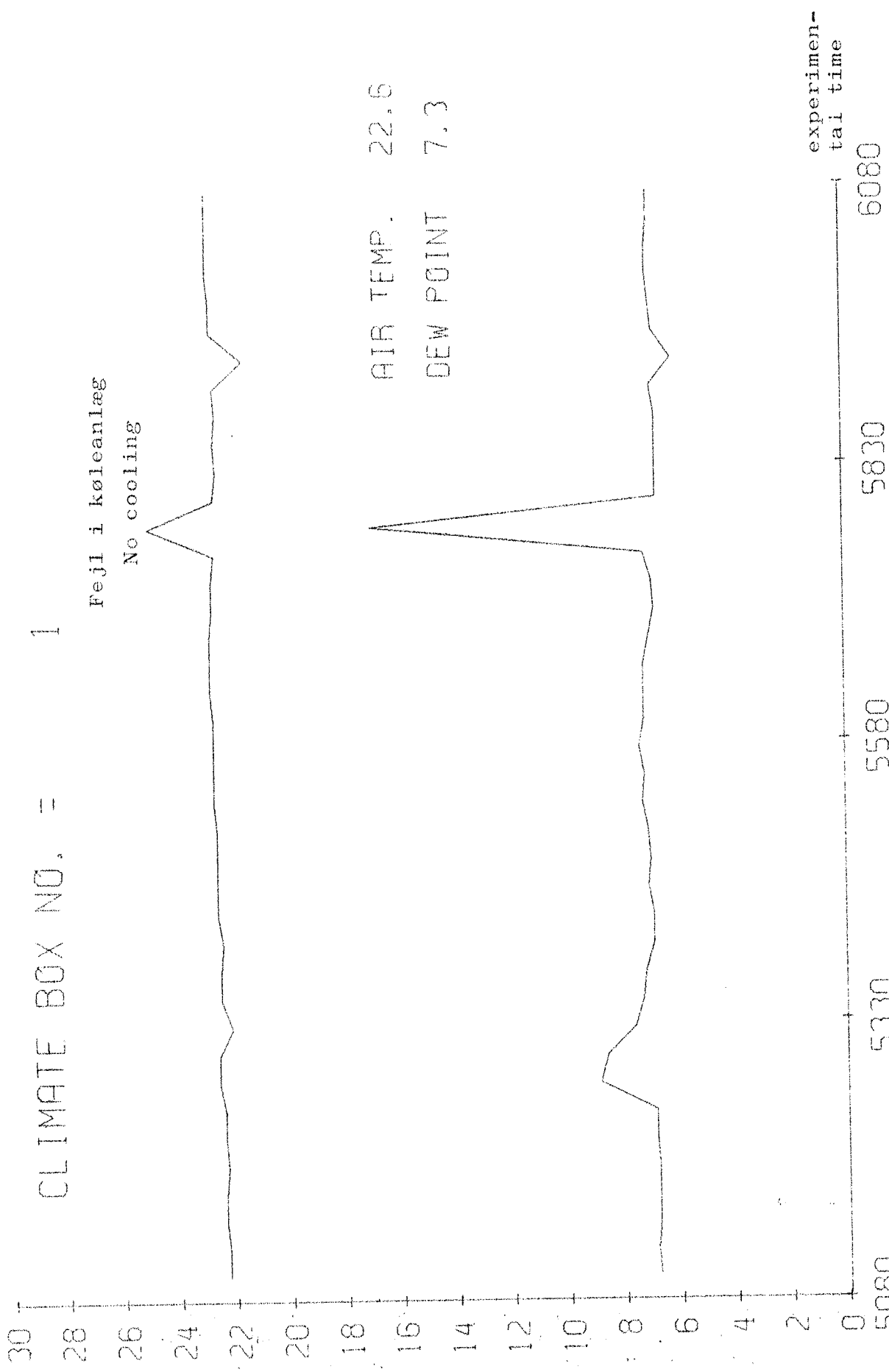


Fig. 5.25. Variation i lufttemperatur og dugpunkt i klimaskab under udtørring af prøvelegeme nr. 198.

Variations in air temperature and dew-point in climate box during drying of specimen no. 198.



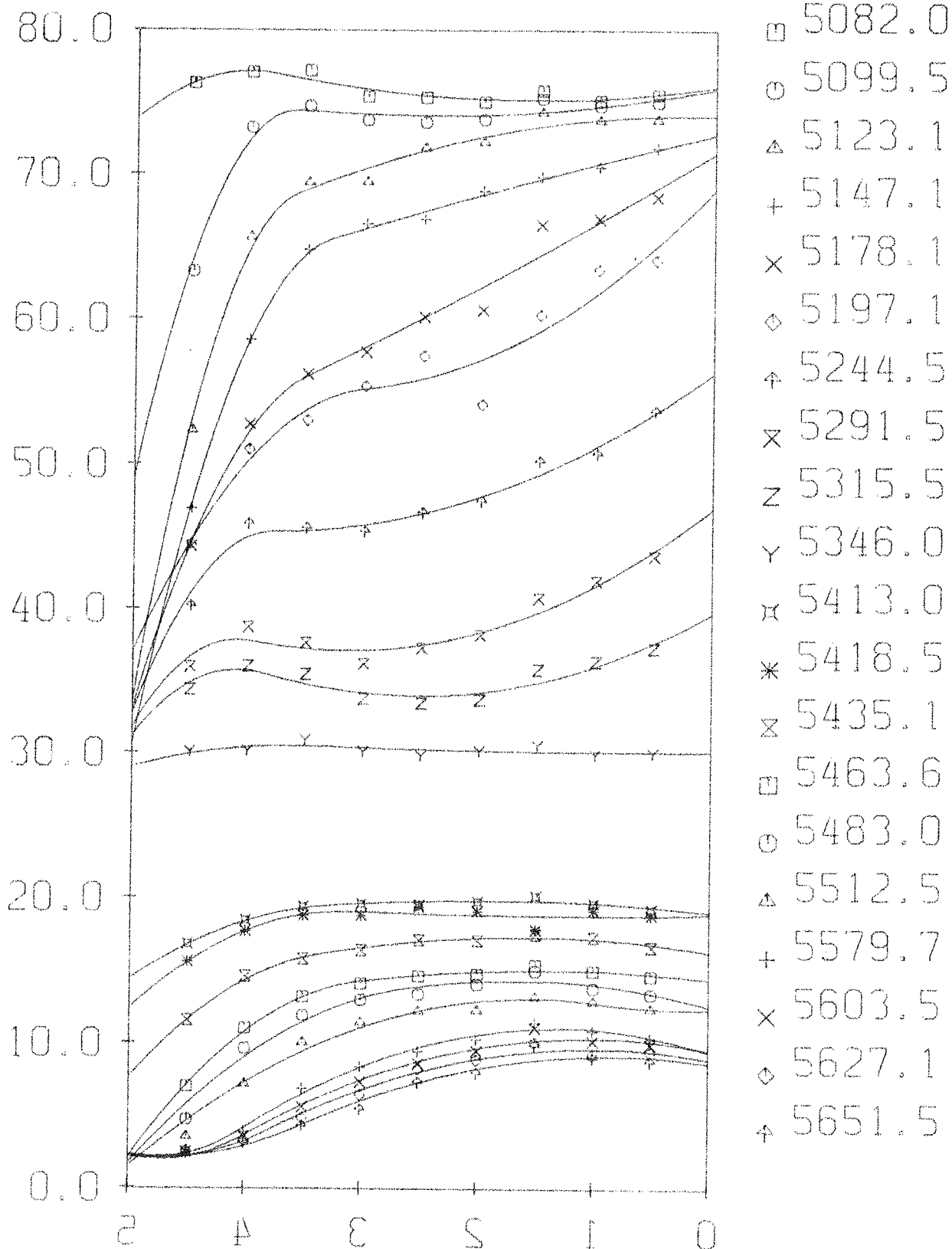


Fig.5.26. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr.198 under udtørring. Fugtindhold (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side.

Moisture distributions in specimen no.198 during drying experiment. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side.

# WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 198

91

CARD TYPE = 27

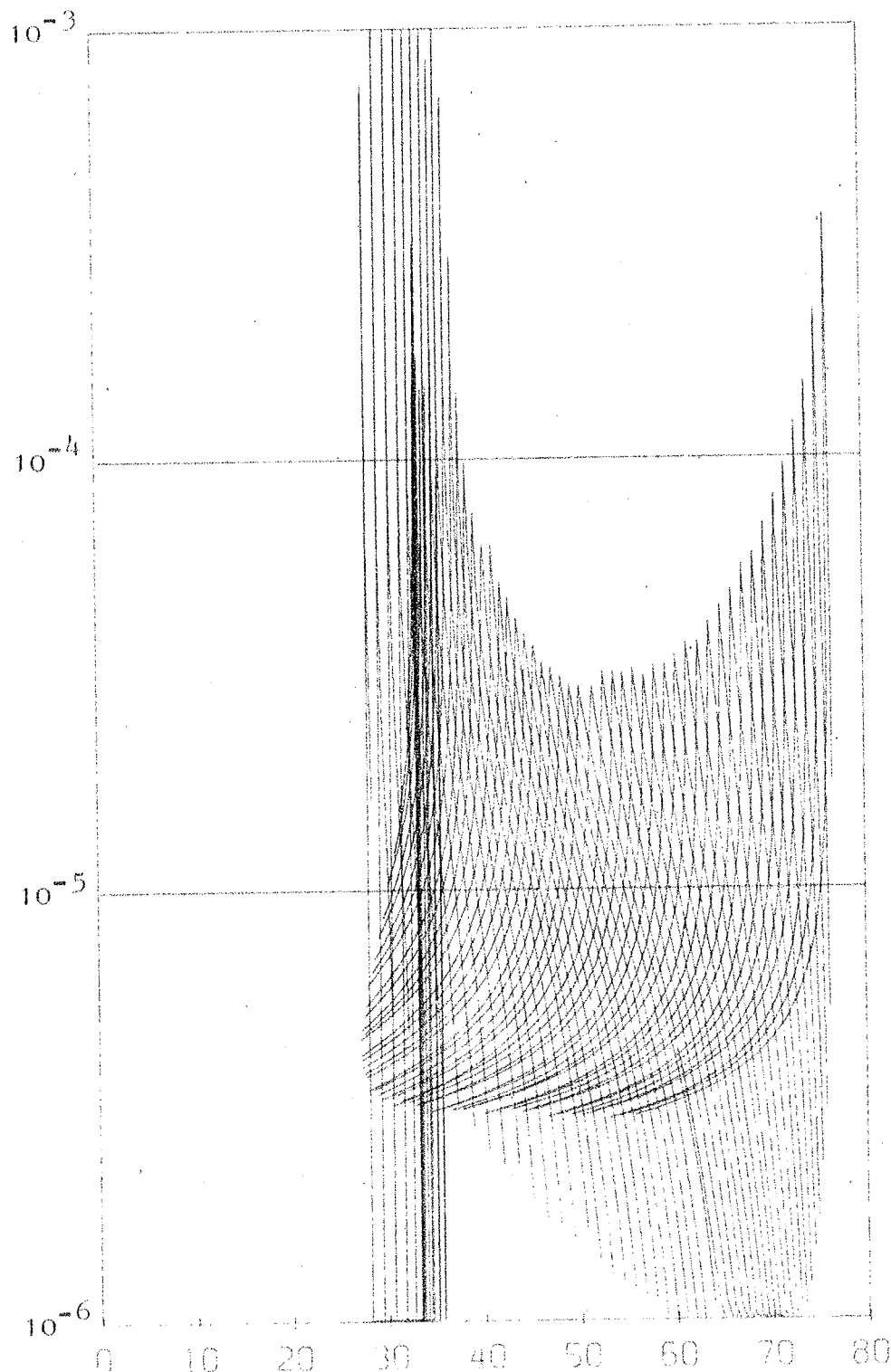


Fig.5.27. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøg med prøvelegeme nr.198. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet ( $\% \text{vol}$ ).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment (specimen no.191). Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content ( $\% \text{vol}$ ).

### 5.3.3. Udtørring af prøvelegeme nr. 188.

Forsøget er startet med et vandmættet prøvelegeme ( $\sim 75\%$  vol). Udtørringen blev foretaget i et klimaskab med temperaturen  $25,5^\circ\text{C}$  og dugpunktet  $7^\circ\text{C}$ , som det fremgår af fig. 5.28. Lufthastigheden var ca. 2 m/sek. Disse værdier medførte en stor udtørringshastighed (fig. 5.14) på ca. 6 g/h. Fugtfordelingerne under udtørringen ses på fig. 5.29.

Det ses, at fugtindholdet ved starten ikke er ensartet i prøvelegemet, idet det er lavere ved den tætte side. Dette forhold findes gentaget på de følgende målinger indtil ca. 20% vol, hvor fugtindholdet er praktisk taget konstant. Med sådanne fugtfordelinger er det ikke muligt at beregne kapillarledningstallet med formlen  $g = -D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi$ , idet grad  $\psi$  skifter fortegn.

Hvis startværdien kun afspejlede forskelle i det maksimalt oprindelige fugtindhold, ville den viste bølgeform hurtigt udviskes. Da dette ikke sker, kan det kun skyldes hysteresefænomener, som netop ville medføre, at for samme potential ville fugtindholdet i den del, der er nærmest den tætte side, til stadighed være lavere.

Som potential kunne tænkes på suction-begrebet, der som det ses af fig. 3.5. netop har en hysteresesløjfe ved fugtindhold over  $300 \text{ kg/m}^3$  (rumvægt  $500 \text{ kg/m}^3$ ) svarende til det område, hvor vore forsøg viser konstant fugtindhold. Denne sløjfe løber netop sammen i dette område, svarende til, at oprindelige hysteresefænomener fra området over 30% vol ikke vil afspejle sig for lavere fugtindhold. Dette fremgår også af de målte fugtfordelinger. Foretog man en korrektion af fordelingerne ved at anvende begrebet "relativ mætningsgrad", ville disse bølger næsten forsvinde. Men da dette er behæftet med en stor grad af usikkerhed, er beregning ikke gennemført.

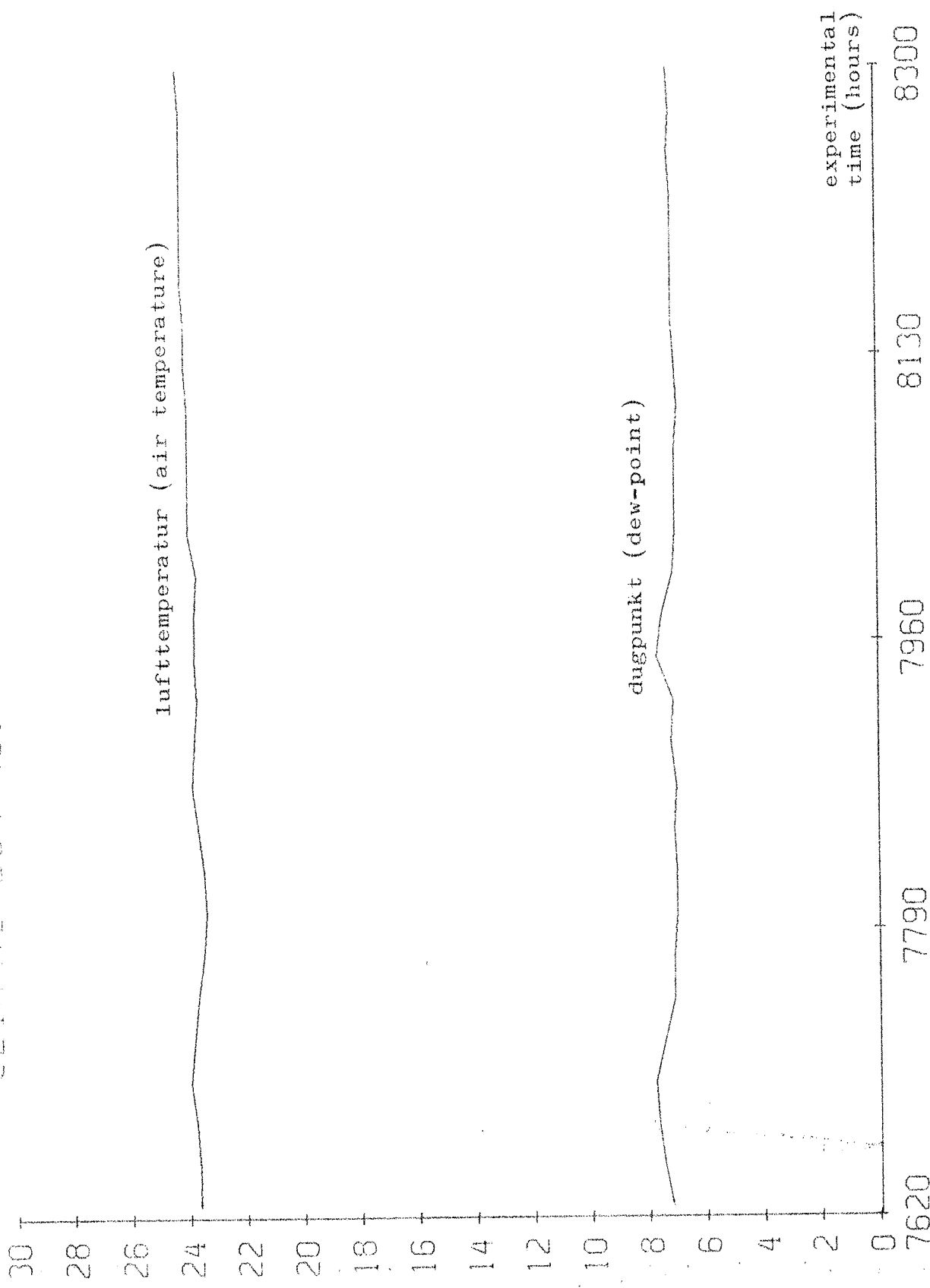


Fig. 5.28. Variation i lufttemperatur og dugpunkt i klimaskab under udtørring af prøvelegeme nr. 188.

Variations in air temperature and dew-point in climate box during drying of specimen no. 188.

SPECIMEN NUMBER =

188

94 CARD TYPE =

24

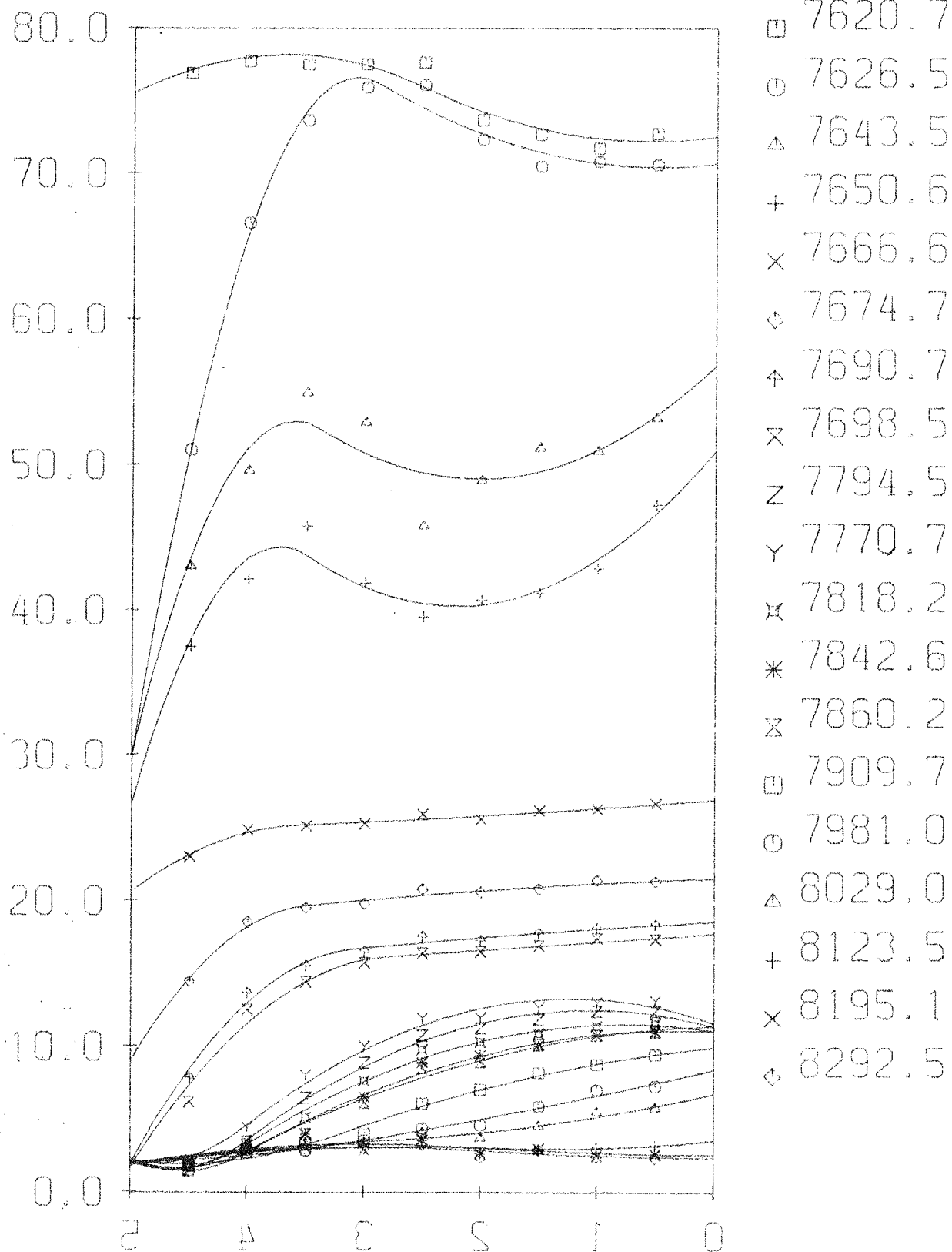


Fig.5.29. Fugtfordelingerne i prøvelegeme nr.188 under udtørring. Fugtindholdet (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side.

Moisture distributions in specimen no.188 during drying experiment. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side.

#### 5.3.4. Udtørring af prøvelegeme nr. 173.

Forsøget er startet med et prøvelegeme, som ved et tagkondensforsøg opnåede et meget højt fugtindhold som følge af overfladekondensation. Udtørringen skete ved en lufttemperatur på 22°C og et dugpunkt på 9°C.

I dette tilfælde er både fugtfordelinger og temperaturfordelinger målt. Ved starten er fugten fordelt med højeste niveau i overfladen, men dette jævnes ud ved de ca. 30% vol (fig. 5.30). Derefter sker udtørring på den sædvanlige måde som kapillarsugning og diffusion.

Den sidst målte fugtfordeling til tiden 7603 h er interessant ved at vise hysterens indflydelse på ligevægtsfugtindholdet. Fugtindholdet i ligevægt er højest, hvor der var maksimum ved starten. I fig. 5.31 er udtørringsforløbet vist i form af fugtindholdet for de enkelte lag i afhængighed af tiden. I fig. 5.32 ses temperaturvariationerne i de enkelte lag i afhængighed af tiden (samme tidsmålestok som fugtindholdet). Det fremgår klart, at temperaturen i starten indtil ca. 6970 h ligger væsentlig under lufttemperaturen med temperaturen 5 mm fra overfladen som den laveste. Spidserne på temperaturkurverne skyldes gamma-transmissionsmålinger. Sammenlignes temperatur- og fugtkurverne, fremgår det, at temperaturerne ændrer sig, når udtørringshastigheden for prøven går ned (d.v.s. under de ca. 30% vol). Dette skyldes, at den nødvendige varme til fordampning af vandet mindskes med udtørringshastigheden. Fra tidspunktet 6970 h er udtørringen så at sige isotherm, idet variationerne i temperaturen svarer til luftens (forskell skyldes, at lufttemperaturen ikke måles lige over prøven).

For at beregne kapillarledningstallet i dette tilfælde er det valgt at beregne nogle tilnærmede fugtfordelinger, som det fremgår af fig. 5.33. Herudfra beregnes på sædvanlig måde kapillarledningstallet, som ses på fig. 5.34.

SPECIMEN NUMBER = 173

CARD TYPE = 24

96

CALIBRATION NO. = 99

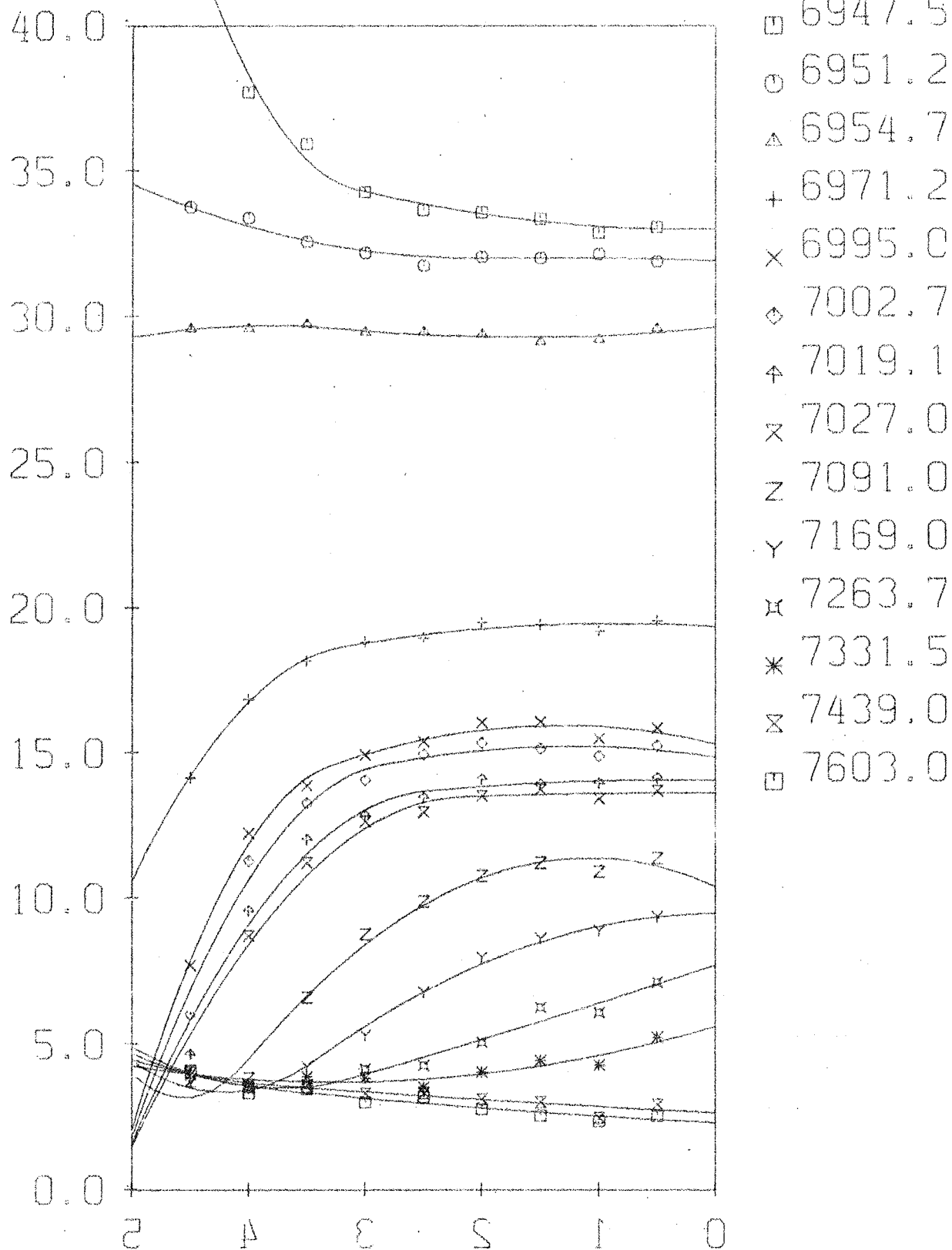


Fig. 5.30. Fugtfordelingerne i prøvelegeme nr. 173 under udtørring. Fugtindholdet (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side.

Moisture distributions in specimen no. 173 during drying experiment. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side.

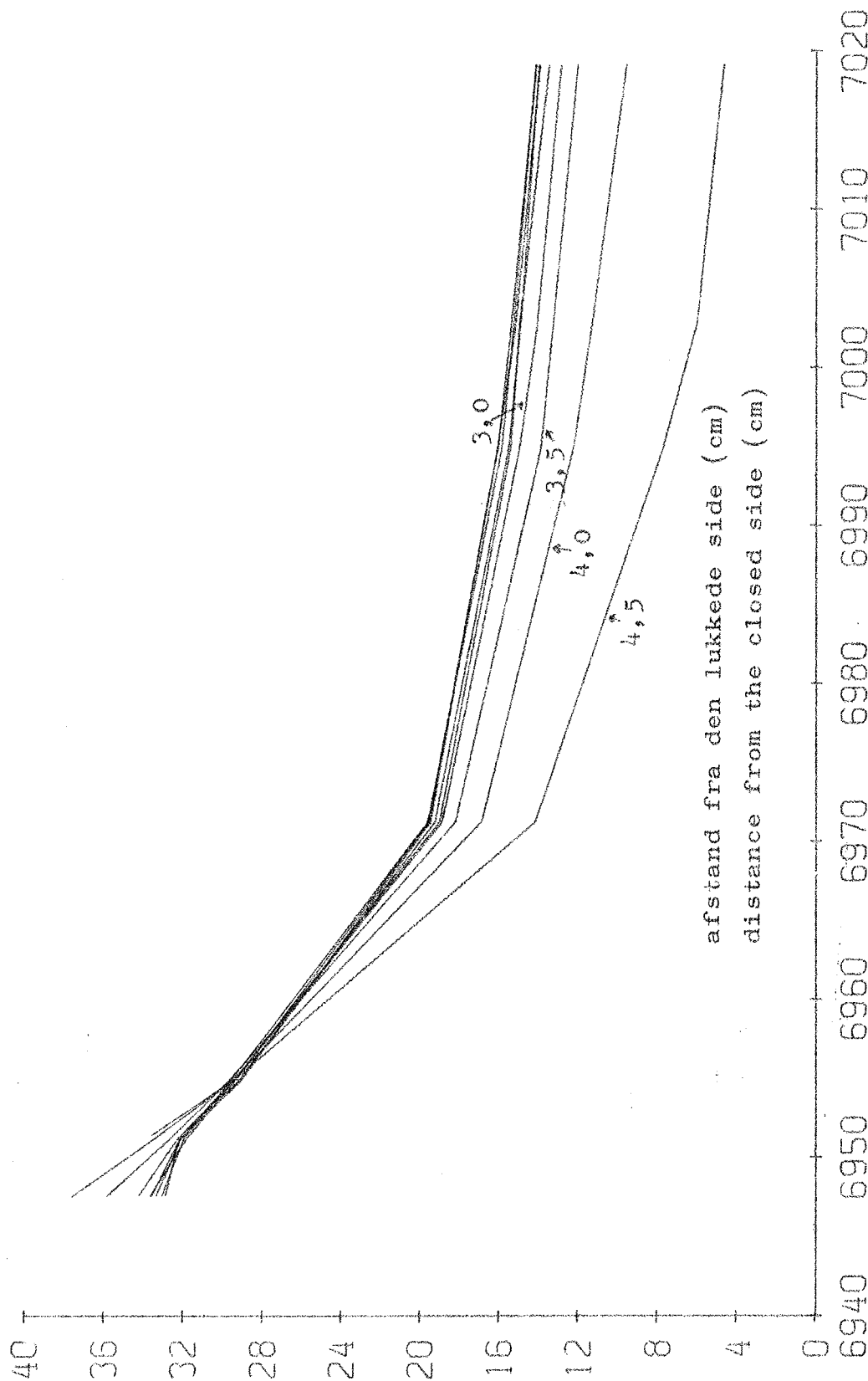


Fig.5.31. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr.173 under udtørningsforsøg. Fugtindhold (%vol) i afhængighed af den eksperimentelle tid (timer). Kurverne er plottet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Moisture distributions in specimen no.173 during drying experiment.

Moisture content (%vol) versus experimental time (hours). The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.



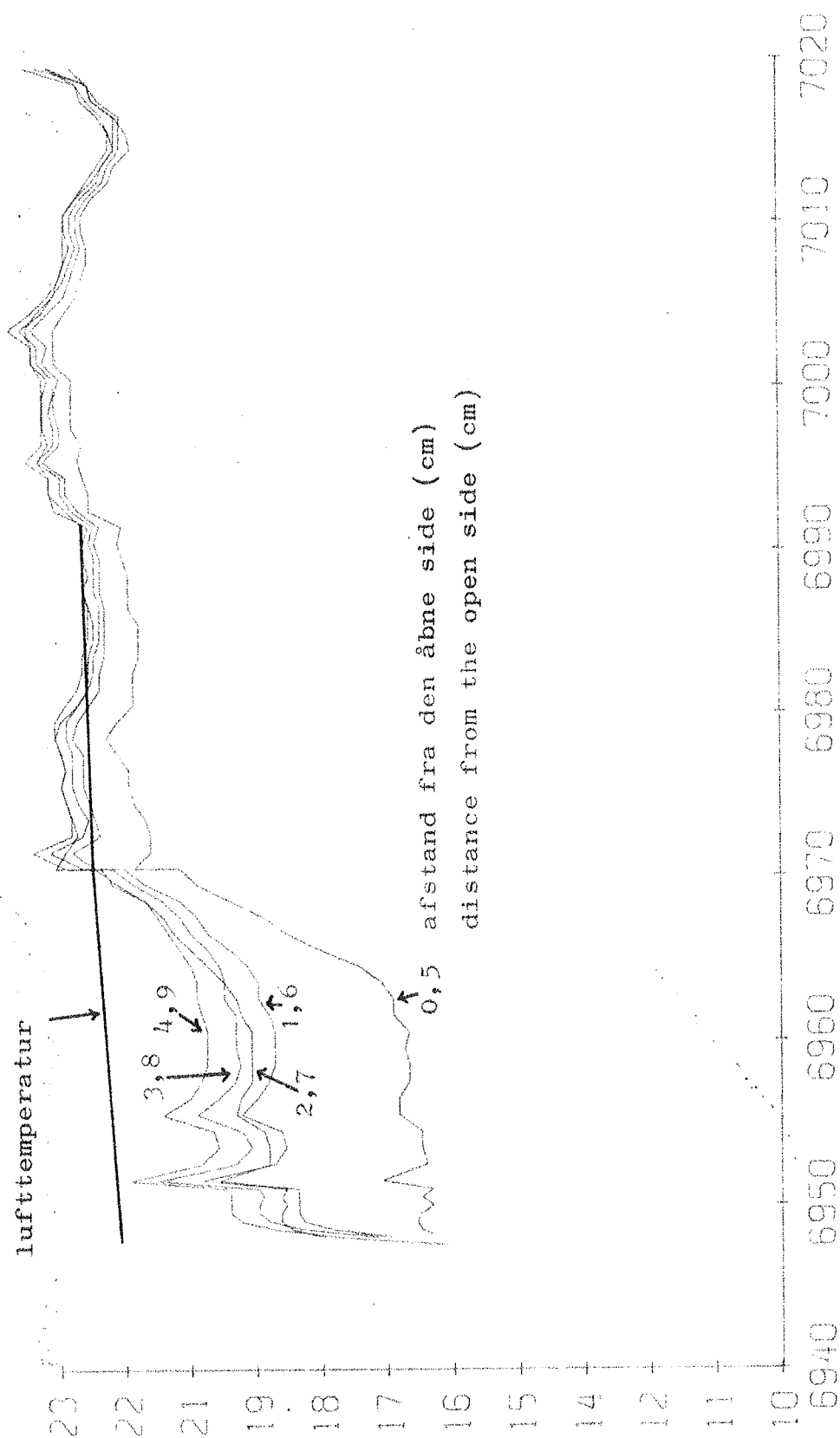


Fig. 5.32. Temperaturfordelinger i prøvelegeme nr. 173 under udtørningsforsøg.  
 Temperatur (°C) i afhængighed af den eksperimentelle tid (timer).  
 Temperature distributions in specimen no. 173 during drying experiment.  
 Temperature (°C) versus experimental time (hours).

SPECIMEN NUMBER =

173

CARD TYPE =

24

CALIBRATION NO. =

0

99

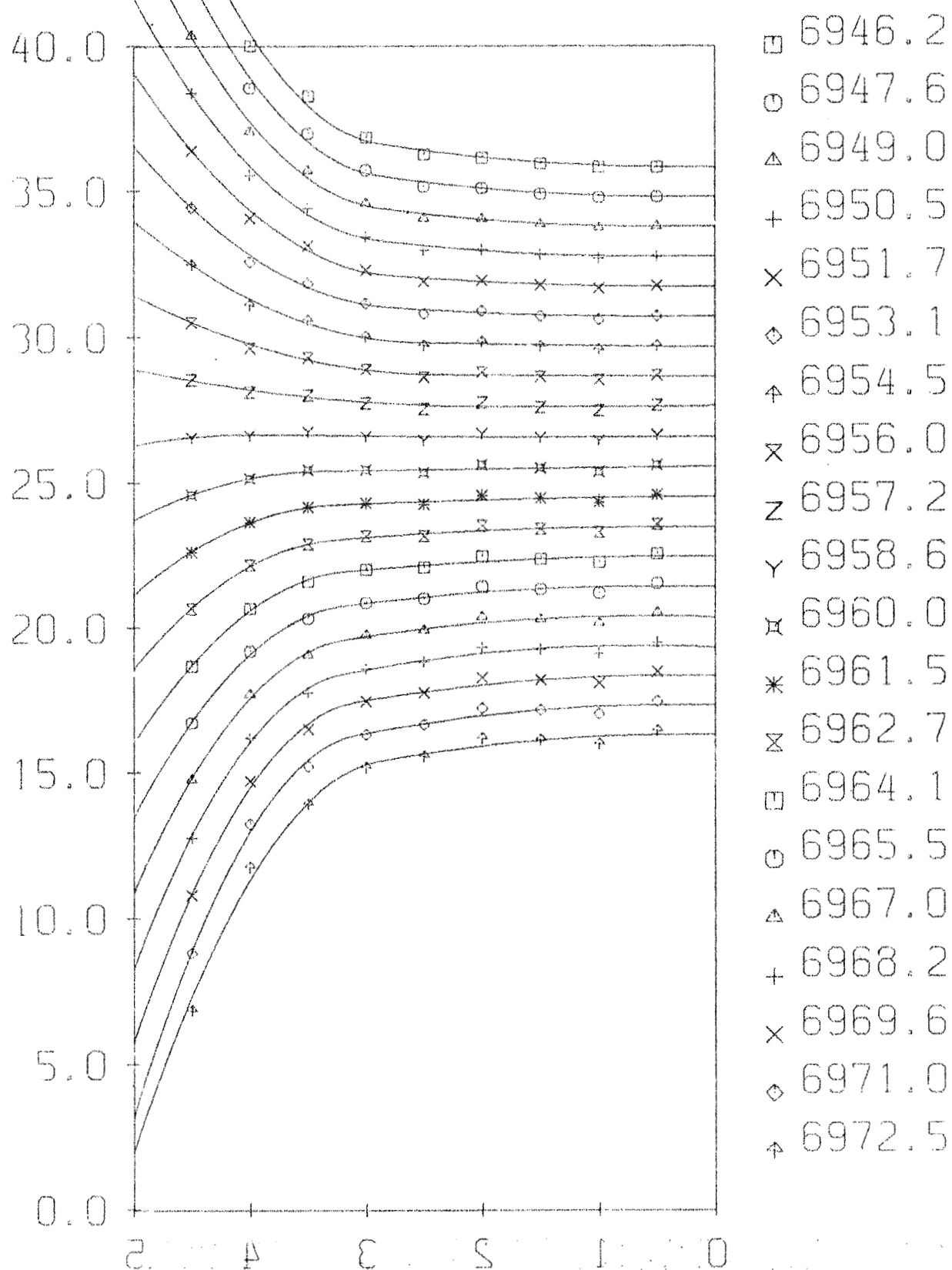


Fig.5.33. Fugtfordelinger beregnet ud fra målte fugtindhold ved regression. Fugtindhold (%vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den lukkede side.

Moisture distribution calculated from measured moisture contents by polynomial regression. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the closed side.

## WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 173

CARD TYPE = 27

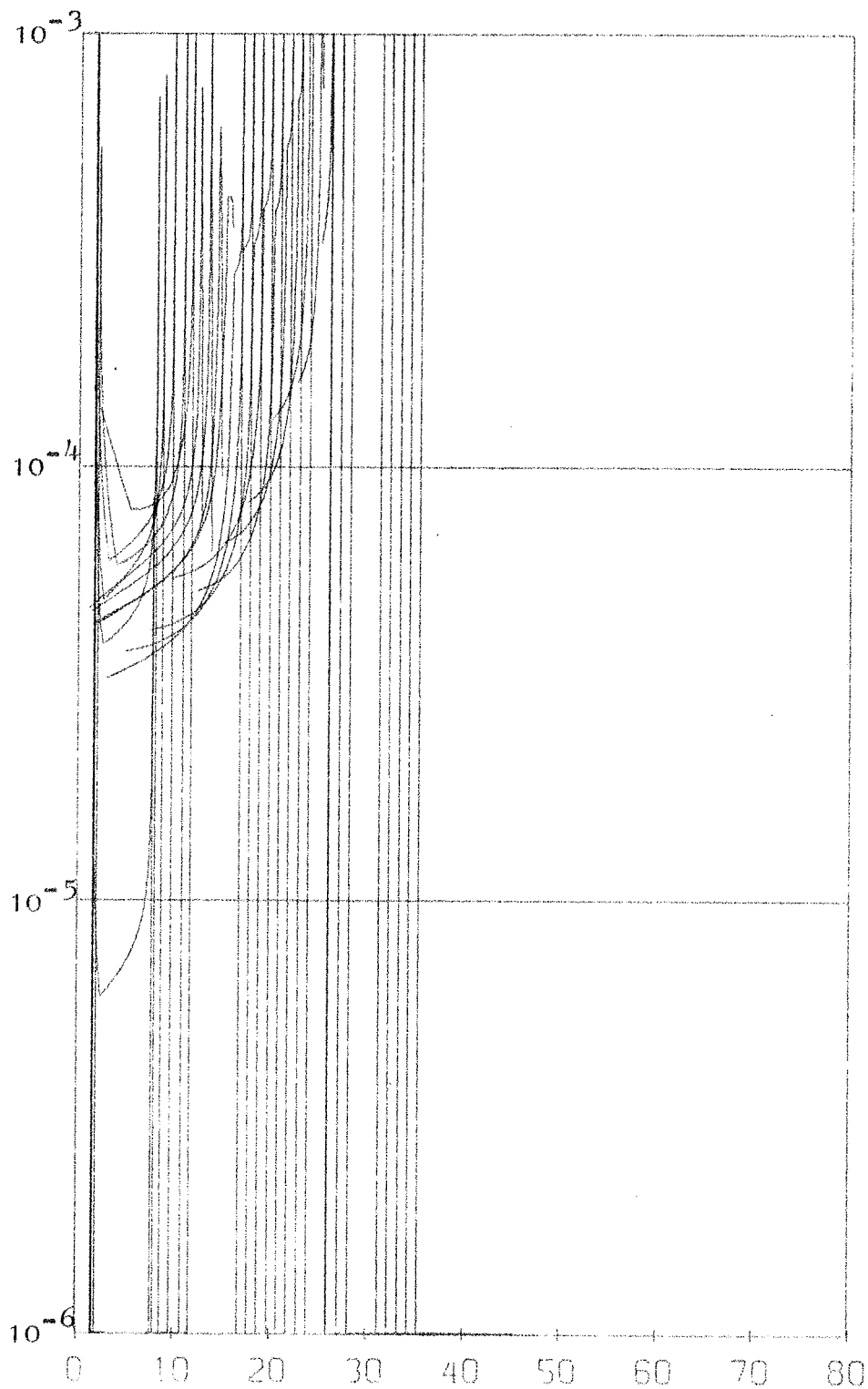


Fig. 5.34. Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøg. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet ( $\% \text{vol}$ ).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment. Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content ( $\% \text{vol}$ ).

De lange, lodrette linier er igen et udtryk for ubrugelige beregninger. Kapillarledningstallet udgør et område mellem  $10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  ved 30% vol og  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$  ved 10% vol. Der kan ses en stor spredning på resultaterne, som muligvis skyldes, at termodiffusionen ikke er uden betydning.

#### 5.3.5. Udtørring af prøvelegeme nr. 185.

For at give et bedre sammenligningsgrundlag for de beregnede kapillarledningstal fra 25% vol til 5% vol er dette eksempel medtaget. Fig. 5.35 viser et kapillarledningstal, som stiger med stigende fugtindhold. Iøvrigt viser kurven god overensstemmelse med fig. 5.18.

#### 5.4. Sammenligninger med andres forsøg

En sammenligning mellem fugtfordelinger målt af KRISCHER (fig. 5.2) og VAN DER KOOI (fig. 5.4) samt prøvelegeme nr 197 viser, at der er bedst overensstemmelse mellem VAN DER KOOI og nr. 197. KRISCHER's kurver viser paraboliske fugtfordelinger med stadigt aftagende fugtindhold fra den tætte til den lukkede side af prøvelegemet. Ved KOOI-fordelingen er der tendens til mere variable kurver. Det må noteres, at KOOI's fugtfordelinger i området 5-10 cm inde i prøven er helt anderledes end de målte værdier. For ingen af de tidligere forsøg er der fundet et område med konstant fugtindhold ved 35-25% vol. Dette er ret bemærkelsesværdigt, da alt tyder på, at der er tale om materialer med meget nær samme struktur. For både KRISCHER's og KOOI's forsøg gælder det, at udtørningshastigheden er væsentlig større end vore forsøg viser.

En sammenligning mellem de beregnede kapillarledningstal (fig. 5.36) viser, at for fugtindhold større end 30% vol stemmer vore forsøg bedst med KOOI's, da KOOI også finder et minimum for kapillarledningstallet omkring 50% vol. Den numeriske værdi er dog ikke den samme, og KOOI finder,

## WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 185

CARD TYPE = 27

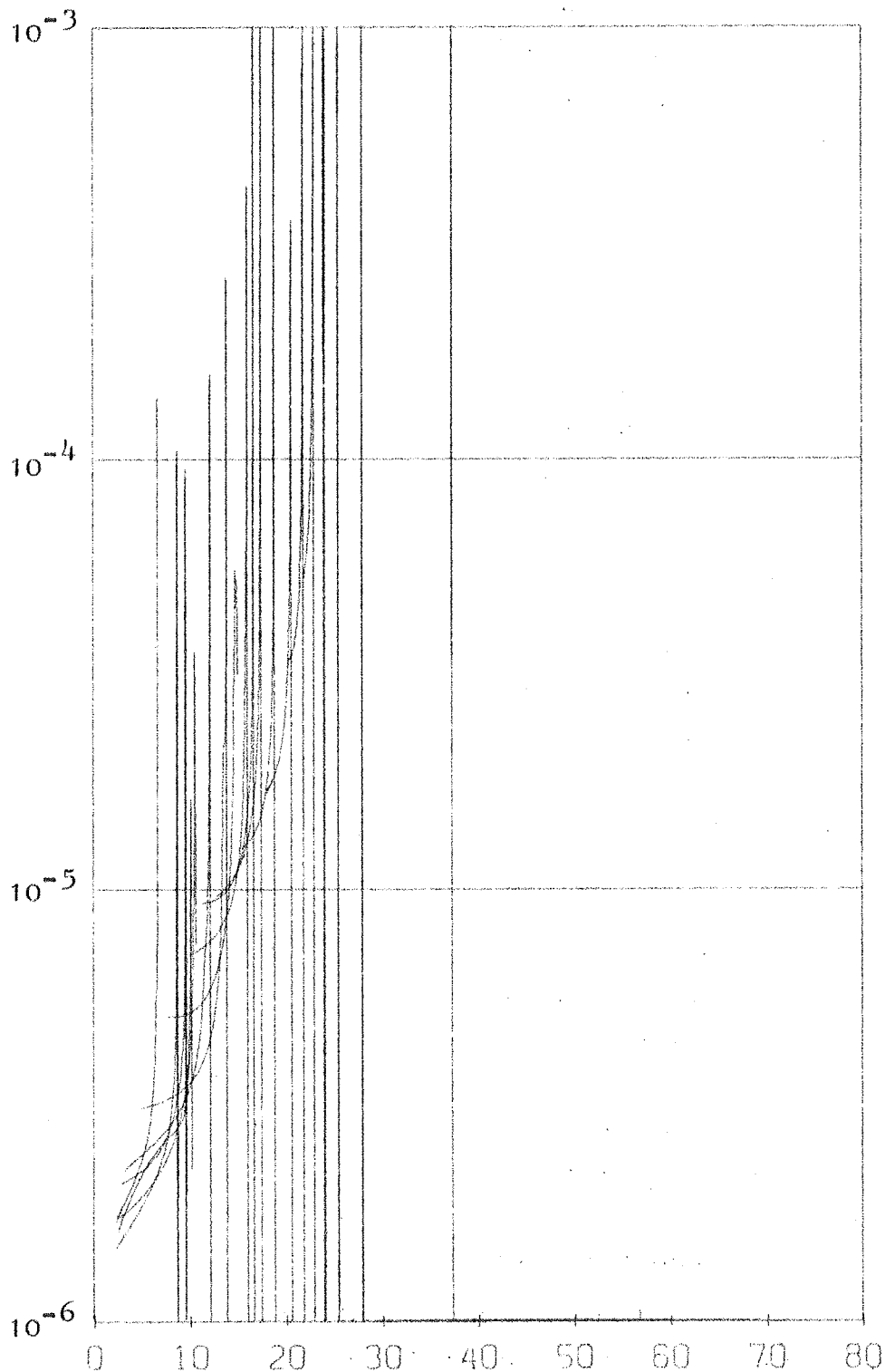
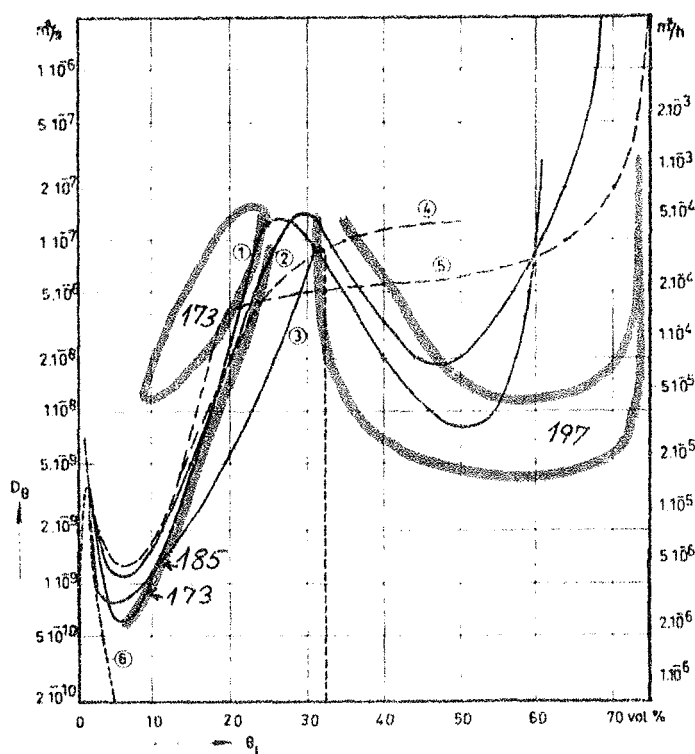


Fig. 5,35, Kapillarledningstallet beregnet fra udtørningsforsøg. Kapillarledningstallet ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Moisture diffusivity calculated from drying experiment. Diffusivity ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) (log-scale) versus moisture content (%vol).

at kapillarledningstallet stiger kraftigt allerede ved 60% vol, hvor vore forsøg viser 70-75% vol. Dette minimum i kapillarledningstallet stemmer med, hvad CAMMERER [7] har fundet for glaskugler (fig. 5.37). KRISCHER's resultat i dette område afviger, idet der her er fundet et næsten konstant kapillarledningstal. For området fra 25% vol til 5% vol er der forholdsvis god overensstemmelse mellem forsøgene med prøvelegemerne nr. 185 og nr. 197 samt KRISCHER's og KOOI's resultater. Forsøget med prøvelegeme nr. 173 afviger væsentligt, idet kapillarledningstallet ligger noget højere, sandsynligvis på grund af, at der her har været en større temperaturdifferens over prøvelegemet under udtørringen.



Diffusion coefficient  $D_0$  for cellular concrete determined by:

1. drying experiments (decreasing moisture content)
2. a stationary moisture flux (decreasing moisture content)
3. a stationary moisture flux (increasing moisture content)
4. drying experiments (decreasing moisture content)
5. a stationary moisture flux (decreasing moisture content)
6. theoretical curve for contribution of vapour transport ( $D_{0v}$ )

KOOI

KRISCHER

own drying experiments

Fig. 5.36. Kapillarledningstallet for gasbeton.

Moisture diffusivity of lightweight concrete.

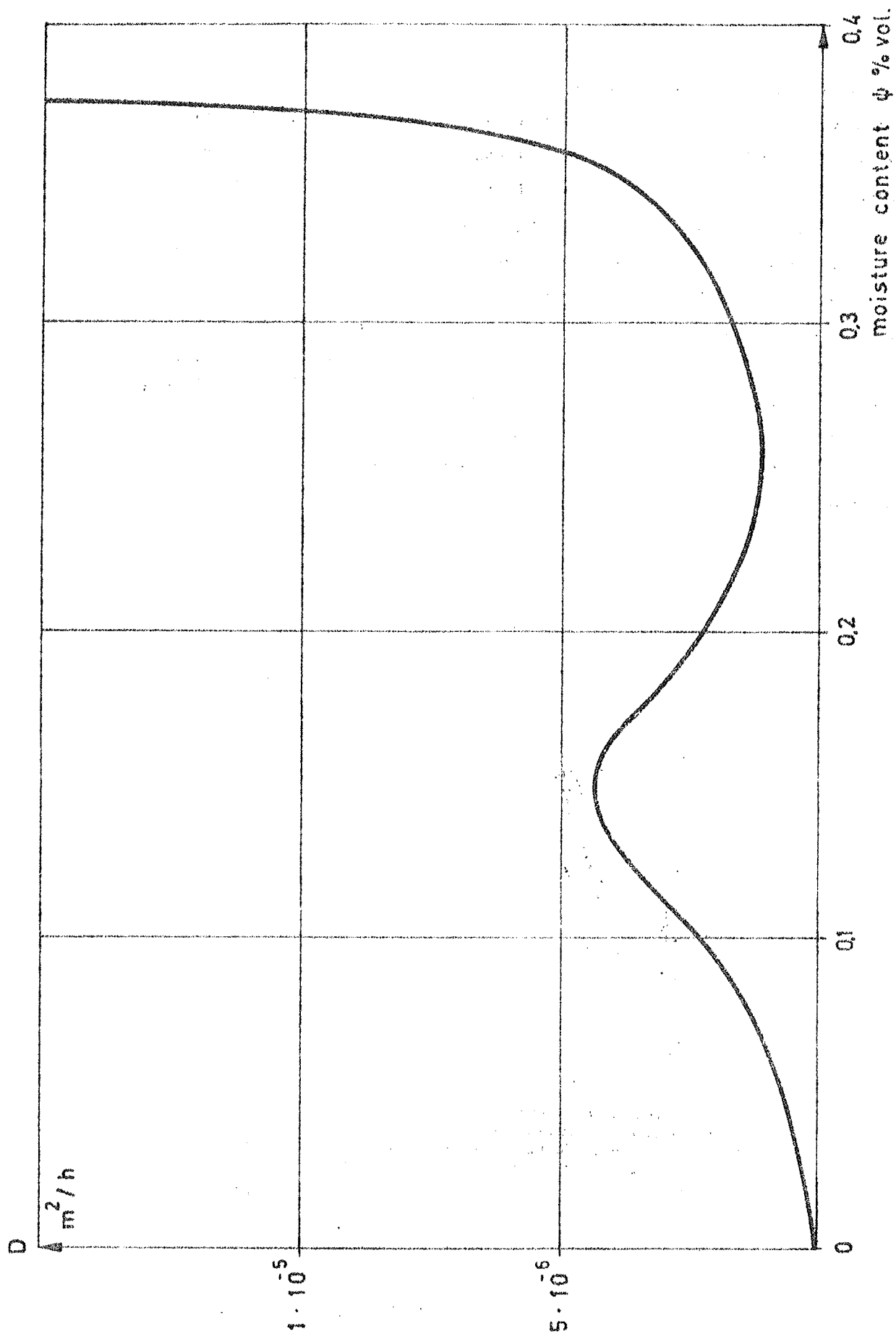


Fig. 5.37. Kapillarledningstallet for glaskugler.  
Moisture diffusivity of glass beads. From CAMMERER (1963).

KRISCHER's og KOOI's (fig. 5.6 og 5.7) beregnede kapillarledningstal er markerede som punkter på figurerne, men der er ingen omtale af, hvor i prøven og fra hvilke tidspunkter punkterne stammer. Afvigelserne mellem resultaterne må blandt andet skyldes målemetoden for fugtindholdet. For KRISCHER's vedkommende er der tale om kapacitetsmålinger ved 10 Mhz, og der findes en omtale af kalibreringen i [22]. Det er givet, at målingerne er influeret af, hvorledes fugten er fordelt mellem elektroderne, homogent eller inhomogent. Dette forhold kan medføre, at man måler forkert. I dag ville man formodentlig have anvendt en højere frekvens, som er mindre følsom over for inhomogen fugtfordeling.

Ved VAN DER KOOI's metode er anvendt modstandsmålinger, som derefter via en kalibrering, som ikke er omtalt nærmere i [20], omsættes til fugtindhold.

Begge målemetoder er desuden afhængige af temperaturvariationer i prøven under udtørringen. Disse kan ikke være helt uvæsentlige ved den store udtørringshastighed, som det fremgår af fig. 5.3, hvor temperaturfordelinger er vist. Gammatransmissionsmetoden er uafhængig af, hvordan vandet er fordelt, samt af temperaturvariationer. Dette medfører, at der er forskelle mellem resultaterne, må denne metodes resultater foretrækkes.

Ved brug af EDB har vi ud fra 70% vol startfugtindhold og den ikke-stationære fugtligning

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \psi}{\partial K^2}$$

beregnet fugtfordelingerne med den variation af kapillarledningstallet, som fremgår af fig. 5.36 for dels KRISCHER's dels KOOI's beregninger. Resultaterne fremgår af fig. 5.38 og 5.39, som viser, at for et 5 cm prøvelegeme ville man få vidt forskellige fugtfordelinger. Sammenligner man disse beregnede fugtfordelinger med de målte ved prøvelegeme nr. 197 (fig. 5.16), vil man tydeligt se, at overensstemmelse med målte fordelinger kun kan fås, når der er tale om variabelt kapillarledningstal (svarende til VAN DER KOOI) med minimum omkring 50% vol.



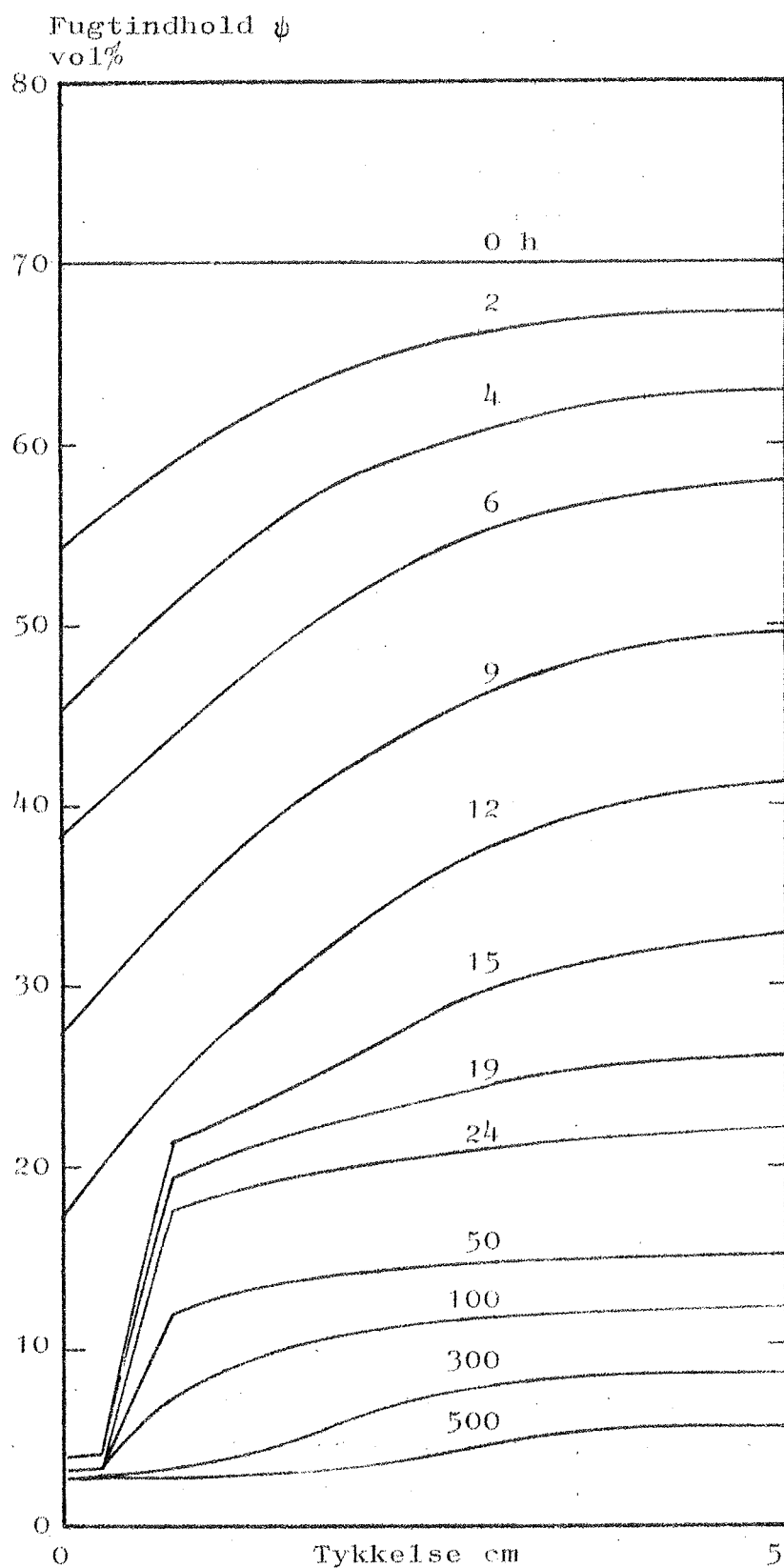


fig. 5.38. Beregnede fugtfordelinger til forskellige tidspunkter (timer) ved udtørring. (Kapillarledningstal fra KRISCHER).  
 Calculated moisture distributions at different times (hours) during drying. (Moisture diffusivity from KRISCHER).

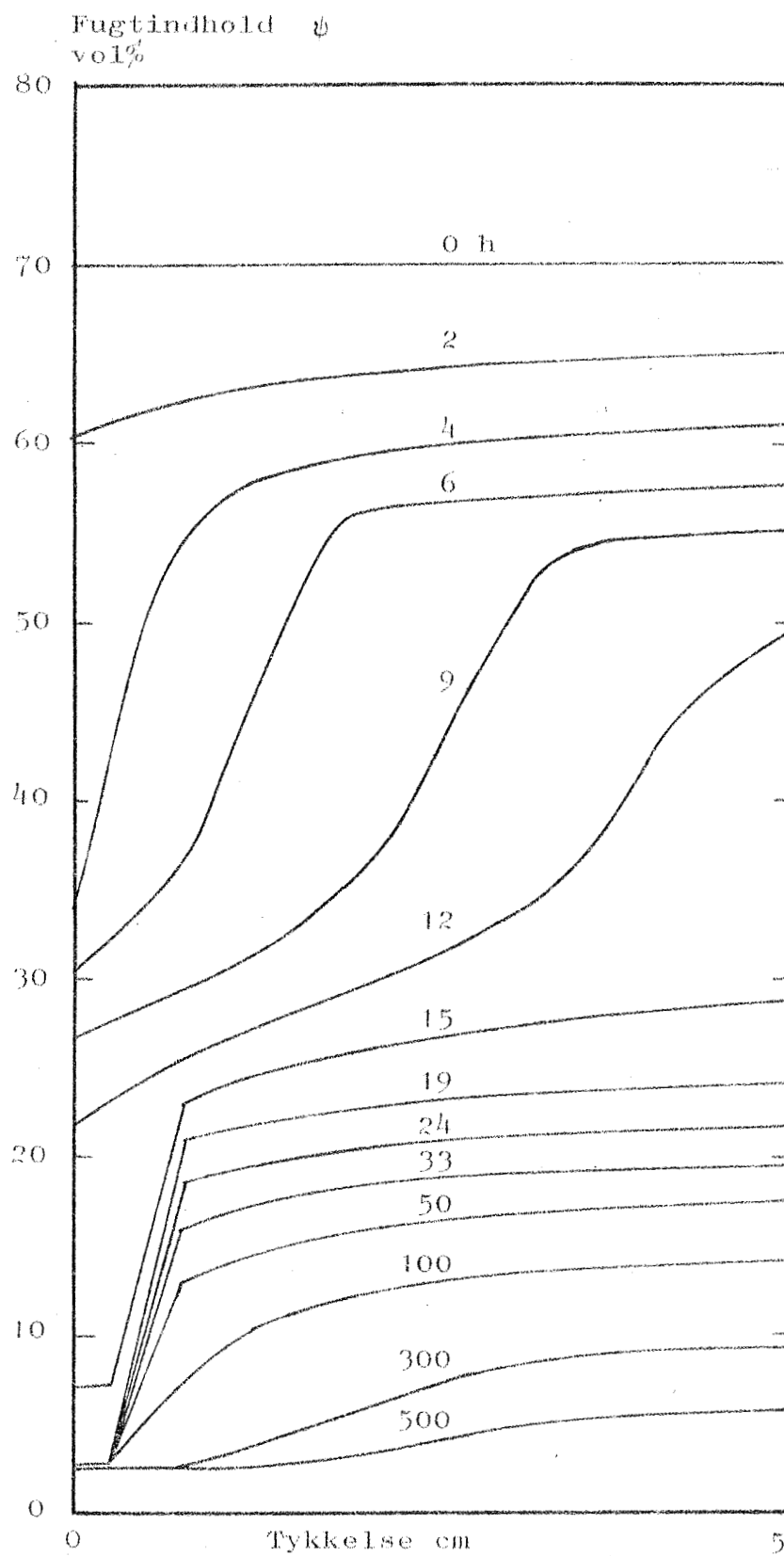


Fig. 5.39. Beregnede fugtfordelinger til forskellige tidspunkter (timer) ved udtørring. (Kapillarledningstal fra K001).  
Calculated moisture distributions at different times (hours) during drying. (Moisture diffusivity from K001).

## 6. KONDENSATION I HOMOGENE, MASSIVE TAGE

### 6.0. Indledning

I homogene, massive tage bliver der om vinteren ophobet fugt og om sommeren udtørret fugt. Det er derfor af stor interesse at vide, om fugtindholdet i taget stiger i årenes løb, eller om det er konstant. Dette meget komplicerede problem har man i de senere år søgt at løse ved brug af EDB-programmer, hvoraf et omtales i et senere afsnit af afhandlingen. For at simplificere teori og forsøg har man valgt at behandle tilfældet med konstante ydre betingelser.

### 6.1. Teorier

De første teorier anvender GLASER's metode [11], hvor transporten regnes som ren diffusion, hvorved den kondenserede fugtmængde pr. tidsenhed kan beregnes. Ved denne metode vil der ske kondensering, så længe der er partialtrykforskelle (fig. 6.1) mellem tagets indvendige og udvendige side. Kondensationen vil på denne måde blive ved i det uendelige, hvis der blot er en lille partialtryksdifferens. Dette kan selvfølgelig ikke være fysisk korrekt.

VOS [44] har opstillet en teori, hvor man foruden diffusionen tager hensyn til fugtophobningen i taget. Princippet er en videreudvikling af GLASER's metode, hvor man i sluttilstanden har grad  $p = 0$  ved overfladen (fig. 6.2).

For at opnå ligevægtstilstand må der samtidig med diffusion ind i materialet ske en kapillarsugning i modsat retning. Fugtophobning tænkes at ske således, at man, hvor den relative fugtighed er 100%, har et kritisk fugtindhold (for gasbeton  $\sim 18\%$  vol).

VOS har udviklet en simpel beregningsmodel for hvor lang tid det tager, inden ligevægt er indtrådt. Det er desuden muligt at optegne fugtfordelingen til et givet tidspunkt.

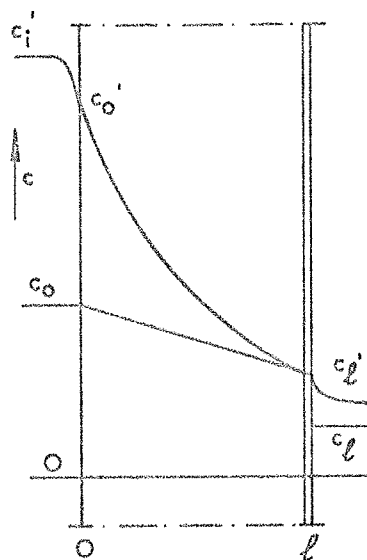


Fig. 6.1. Starttilstand.  
 $c'$  mætningskoncentration  
 $c$  koncentration  
 Initial situation

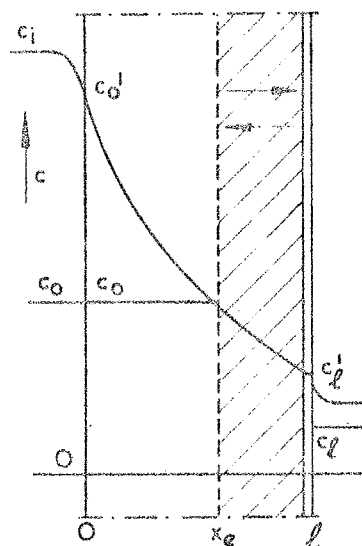


Fig. 6.2. Slutttilstand (ligevægt).  
 I det skraverede område  
 findes væske.  
 Final situation (equilibrium)  
 In the hatching is liquid water.

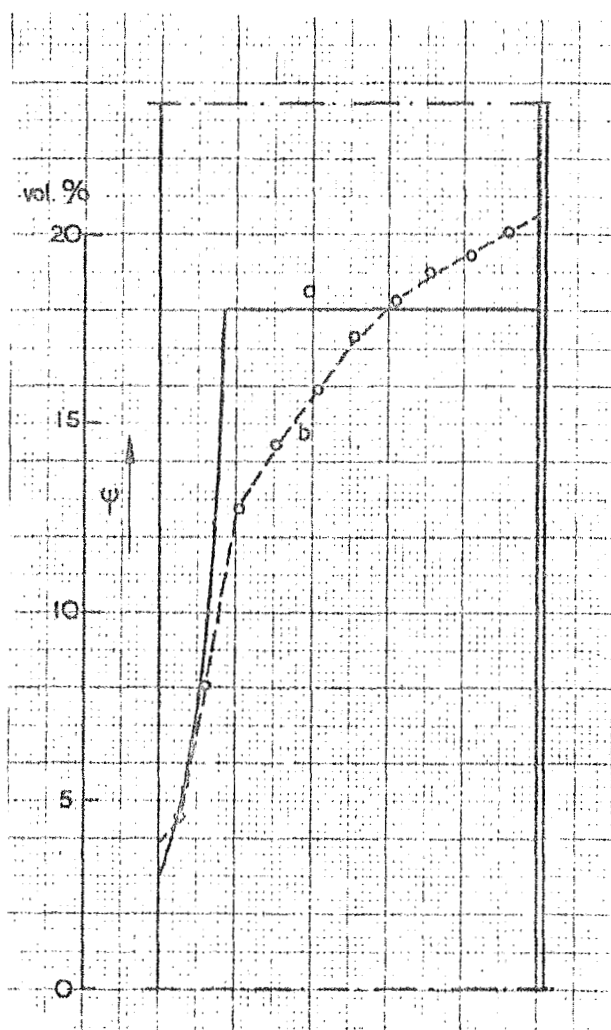


Fig. 6.3. Fugtfordeling i et tag af gasbeton i ligevægt (VOS [44]).

Moisture distribution in a roof of cellular concrete in equilibrium (VOS [44]).

Forsøg (fig. 6.3) giver overensstemmelse med middelfugtindholdet, mens fugtfordelingen ikke stemmer. Denne afvigelse må skyldes den tidligere omtalte simplificering med konstant fugtindhold i det område, hvor der sker kondensation.

HANSEN [16] har vist en metode, hvor man ud fra sådanne forsøg, hvor ligevægt er indtrådt, kan beregne materialets kapillarledningstal.

Fugtstrømmen angives som:

$$g = - d \text{ grad } p - k \text{ grad } u$$

hvor	g er fugtstrømmen	[g/h m <sup>2</sup> ]
	d er et diffusionstal	[g/m h mmHg]
	p er partialtrykket	[mmHg]
	k er et kapillarledningstal	[g/m h %vol]
	u er fugtindholdet	[%vol]

Ved starten af forsøget er grad  $u \sim 0$ , hvorfor diffusions-tallet  $d$  kan beregnes, idet  $g$  og grad  $p$  er kendte. Ved slutningen af forsøget, når stationære forhold er nået, er  $g = 0$ , d.v.s.

$$d \text{ grad } p + k \text{ grad } u = 0$$

D.v.s. kendes  $p$  og  $u$  samt  $d$ , kan  $k = k(u)$  beregnes. Det må bemærkes, at det er en forudsætning, at diffusionstallet er konstant for alle fugtindhold, hvad man nok må tvivle noget på. Desuden er bestemmelsen af grad  $u$  behæftet med nogen usikkerhed, idet  $u$  er bestemt ved veje-tørre metoden på udskårne skiver. Det fremgår desuden, at efter teorien er grad  $p = 0$  i sluttilstanden i en del af prøvelegemet, derfor kan  $k$  ikke beregnes ved disse fugtindhold.

HANSON har udført forsøg med 2 typer letbeton (Siporex og Ytong). Resultaterne (fig. 6.4) viser fugtfordelingen, temperaturfordelingen og mætningstrykket. Den beregnede  $k$ -værdi (fig. 6.5) viser en meget kraftig afhængighed af fugtindholdet med en lodret stigning omkring 16%. Dette kunne man kalde det kritiske fugtindhold.

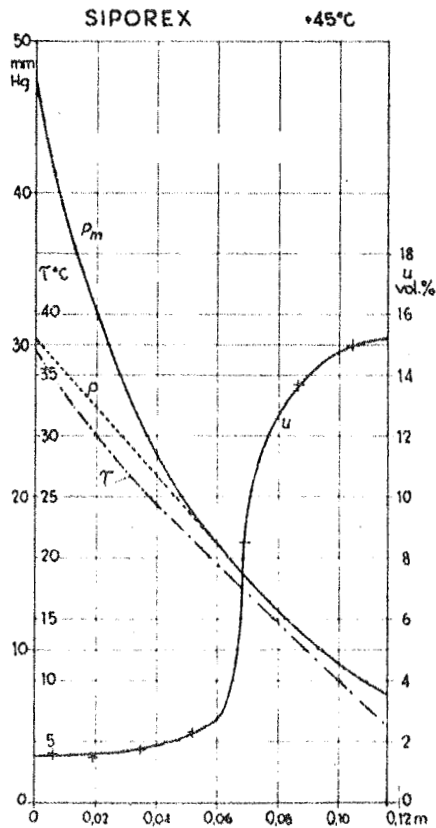


Fig. 6.4.

Fugtfordeling i et tag af gasbeton i ligevægt (HANSON [16]).

Moisture distribution in a roof of cellular concrete in equilibrium (HANSON [16]).

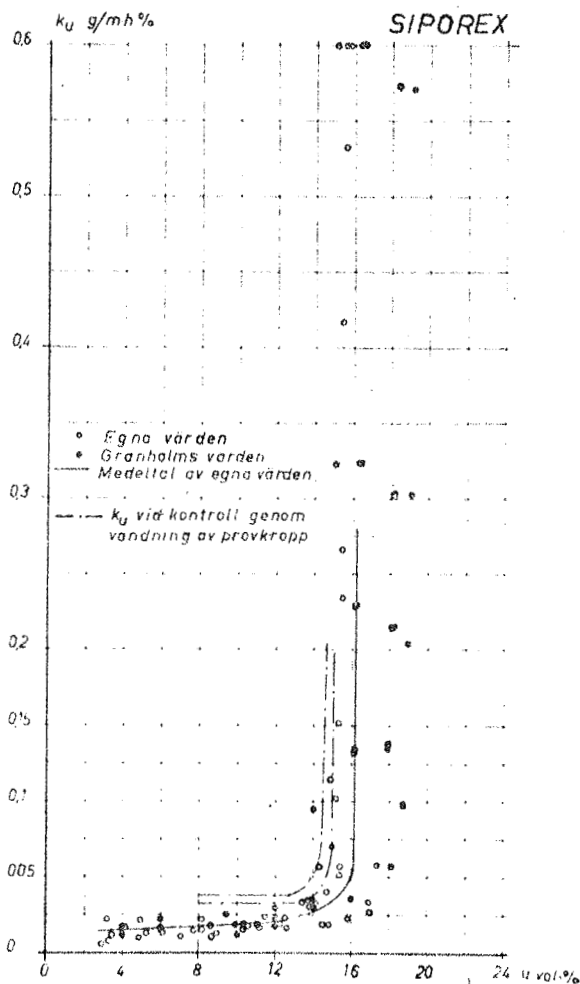


Fig. 6.5.

k-værdien beregnet fra fig. 6.4.

k-value calculated from fig. 6.4.

## 6.2. Nyere, modificeret beregningsmåde

Denne metode bygger på fugttransportligningen:

$$g = - D \rho \text{ grad } \psi - K \text{ grad } T$$

Hvis man har et stationært tilfælde, er transporten = 0, d.v.s.

$$+ D \rho \text{ grad } \psi + K \text{ grad } T = 0$$

Herudfra kan forholdet mellem termodiffusionstallet og kapillarledningstallet beregnes i afhængighed af fugtindholdet:

$$\epsilon = \frac{K}{\rho D}$$

hvor  $\epsilon$  er temperaturgradientfaktoren [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ]  
 $\rho$  er vands densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Dette princip har været anvendt af VAN DER KOOI [20] for forsøg af en helt anden art. Ved disse forsøg blev diffusionstøtte prøvelegemer med bestemte fugtindhold anbragt mellem et koldt og et varmt bad. Der sker herved en om-lagring af fugten med det højeste fugtindhold ved den kolde side. Til slut vil der indstille sig en ligevægt, hvor kapillarsugningen og termodiffusionen er lige store. Forsøgsteknisk kan det naturligtvis være vanskeligt at bestemme, hvornår der er ligevægt. Ud fra sådanne forsøg har KOOI beregnet temperaturgradientfaktoren ( $\epsilon$ ), se fig.6.6.

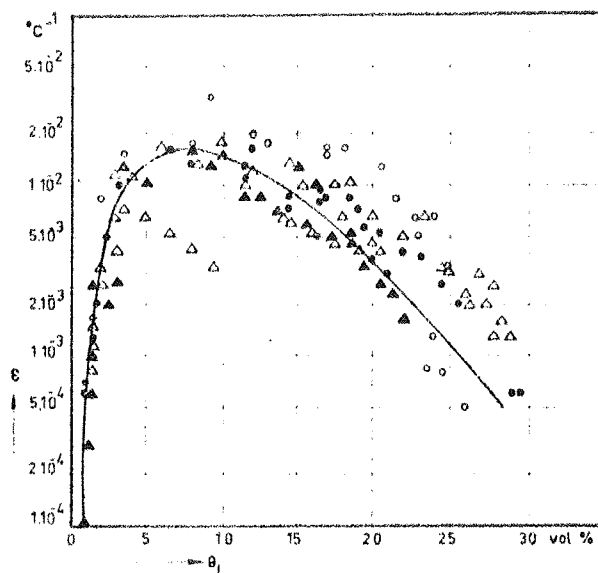
En tilsvarende beregning af denne koefficient kan også foretages ud fra VOS' forsøg (fig. 3) og HANSON's forsøg (fig. 6.4). Disse resultater vil blive omtalt i afsnit 6.7.

Når man benytter  $\gamma$ -stråling til måling af fugtfordelingerne, har man en meget god mulighed for at bestemme, om ligevægt er indtrådt. Desuden kan man ud fra de ikke-stationære forløb beregne  $D = D(\psi)$  og  $K = K(\psi)$  ved brug af

$$g = -D \rho \text{ grad } \psi - K \text{ grad } T ,$$



idet  $\varepsilon = \frac{K}{\rho D}$  er kendt fra de stationære forsøg, grad T og grad  $\psi$  kendes, da  $\psi$  og T måles. Fugtstrømmen kan beregnes ud fra ændringerne i fugtindholdet med tiden.



Temperature gradient factor,  $\varepsilon (= D_T/D_0)$ , for cellular concrete determined from moisture distributions in the stationary state.  $\circ, \Delta$  - from distributions found after one month,  $\bullet, \blacktriangle$  - from distributions found after two months.

Fig. 6.6. Temperaturgradientfaktoren (VAN DER KOOI).  
Temperature gradient factor (VAN DER KOOI).

Hvis man kun kender det ikke-stationære forløb og på anden måde har bestemt D eller K, kan  $\varepsilon$  og den anden faktor beregnes ud fra ligningen.

Principielt kan man godt i stedet bruge en anden transportligning, f.eks. som Hansons

$$g = -d \text{ grad } p - K \text{ grad } u ,$$

men gør man det, er det enkleste at beregne disse koefficienter ud fra D og K ved brug af mætningskurven samt sorptionskurven. Bemærk, at i dette tilfælde bliver d (diffusionstallet) ikke nødvendigvis en konstant.

### 6.3. Forsøgsopstilling

Til tagkondensationsforsøgene er der anvendt klimaskabe af samme konstruktion som for udtørningsforsøgenes vedkommende. I "taget" af klimakassen anbringes prøvelegemerne med den åbne side nedad og den diffusionstætte side opad. Princippet fremgår af fig. 6.7. Oven på prøvelegemet anbringes en plandrejet kontaktkøleplade, der forsynes med kølevæske (vand-glycol blanding) med konstant temperatur fra et termostatbad. For at undgå kondensation på kølepladen og på prøvelegemets yderside samt opnå en så en-dimensional varmetransport som muligt er prøvelegeme og køleplade indsluttet i en flexibel 50 mm tyk isolering (Armaflex) med diffusionstæt overflade. Forsøg har desuden vist, at det for at undgå konvektionsstrømninger i luften mellem isoleringen og prøvelegeme-køleplade var nødvendigt at fylde spalten mellem prøvelegemet og isoleringen med mineraluld. For at sikre en god termisk kontakt mellem prøvelegemet og kølepladen blev der fremstillet en spændeanordning, som pressede prøvelegemet og kølepladen mod hinanden. Fig. 6.8 viser, hvordan opstillingen ser ud med og uden udvendig isolering.

Hvert klimaskab (fig. 6.9) er forsynet med 6 pladser til prøvelegemer, og de bruges på den måde, at de 3 køleplader har forbindelse til 1 termostatbad og de 3 andre til et andet. Man opnår derved at få 2 samtidige forsøg med forskellig "udvendig" temperatur men samme "indvendige" temperatur og fugtforhold. Ved at have 3 prøvelegemer under samme betingelser har man en mulighed for at gøre et skøn over forsøgsusikkerheden.

Hvert prøvelegeme er forsynet med 5 termoelementer, således anbragt at temperaturfordelingen over prøvelegemet kan bestemmes. Dette sker ca. 1 gang pr. døgn. Desuden måles for klimaskabet automatisk ved brug af en datalogger 1 gang pr. time lufttemperatur og vandbadets temperatur (dugpunktstemperatur).

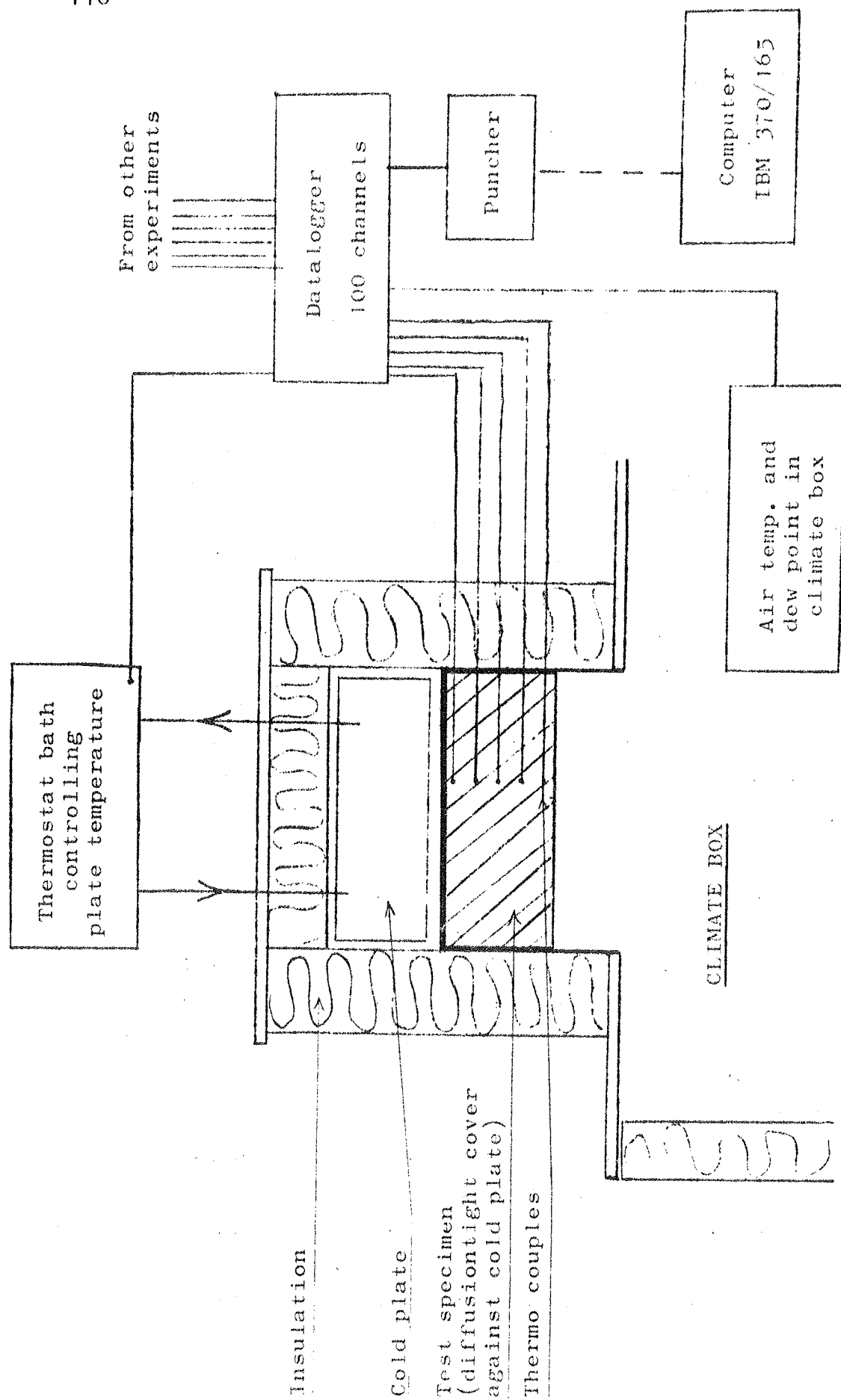
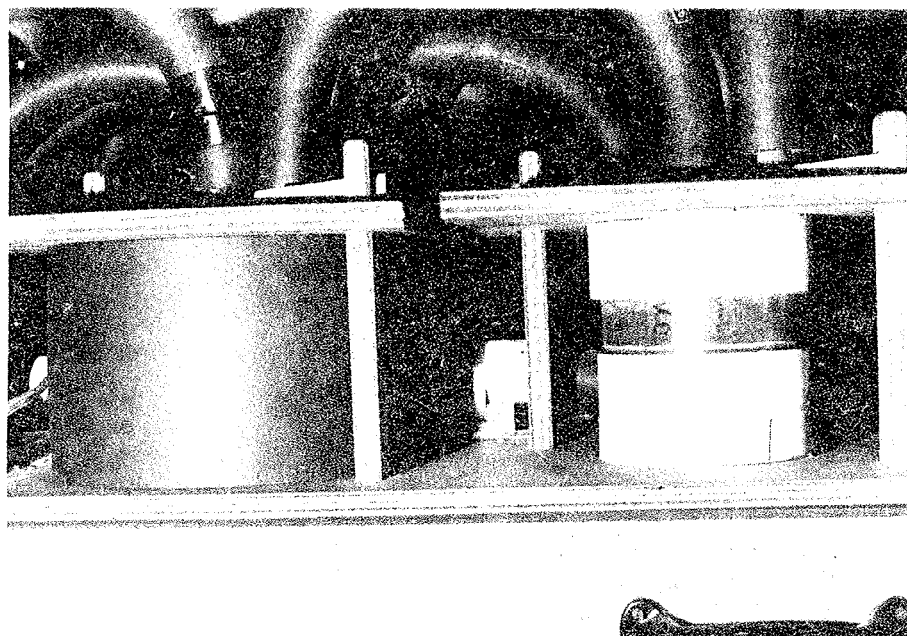


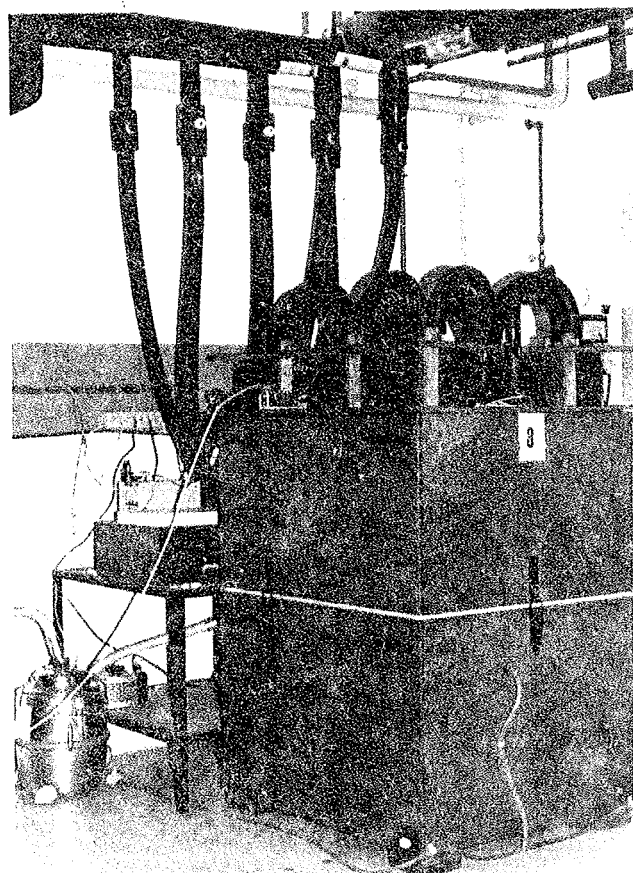
Fig. 6.7. Device for determining condensation in solid roof constructions.



kølevands-  
tilslutning  
cooling water  
connection  
isolering  
insulation  
køleplade  
cold plate  
prøvelegeme  
specimen

Fig.6.8. Prøvelegemernes anbringelse på klimaskabet  
(til højre med den udvendige isolering fjernet).

Specimens on top of the climate box (to the  
right without external insulation).



termostatbad  
thermostat bath

støvsuger  
vacuum cleaner

kølevands-  
tilslutning  
cooling water  
connection

prøvelegemer  
specimens

øvre del af  
klimaskab  
upper part of  
climate box

nedre del af  
klimaskab  
lower part of  
climate box

Fig.6.9. Et klimaskab med 6 tagkondensationsprøver.

Climate box with 6 roof condensation specimens.

Temperatur og dugpunkt i det lokale, hvor forsøget sker, måles også 1 gang pr. time. Alle disse måleresultater fra dataloggeren punches ud som hulstrimmel, der konverteres til hulkort på NEUCC. Eksempler på temperaturfordelinger i prøvelegemer under forsøgene findes vist under forsøgsresultater, f.eks. fig. 6.12.

Fugtfordelingerne i prøvelegemerne måles ved brug af  $\gamma$ -transmissionsmåleudstyret ca. 1 gang pr. uge, idet dette har vist sig at give fornuftige resultater med de anvendte temperatur- og fugtforhold.

#### 6.4. Forsøgsresultater

##### 6.4.0. Indledning

I det følgende gennemgås det første forsøg grundigt og derefter de øvrige kortfattet. Ved hvert forsøg er der normalt anvendt 3 prøvelegemer ved næsten samme temperatur- og fugtforhold. Da de 3 prøvelegemer giver nær ensartede resultater, er det valgt kun at omtale 1 fra hver forsøgsserie, undtagen ved slutresultaterne, hvor alle resultater vises.

##### 6.4.1. Kondensation i prøvelegeme nr. 162.

Ved forsøget er anvendt prøvelegeme nr. 162 med:

rumvægt:	564,0 kg/m <sup>3</sup> ,	højde:	50,3 mm
$\sigma$ (rumvægt):	3,8 kg/m <sup>3</sup> ,	diameter:	121,2 mm

Forsøget er startet med prøvelegemet i ligevægt med omgivelserne svarende til ca. 3,2 %vol.

Ved dette forsøg er på fig. 6.10 angivet temperatur- og dugpunktsvariationerne i lokalet, hvor forsøgsopstillingen står. De tilsvarende variationer i klimaskabet ses på fig. 6.11, og man kan se, at kun lufttemperaturen i klimaskabet influeres lidt af forholdene i lokalet.

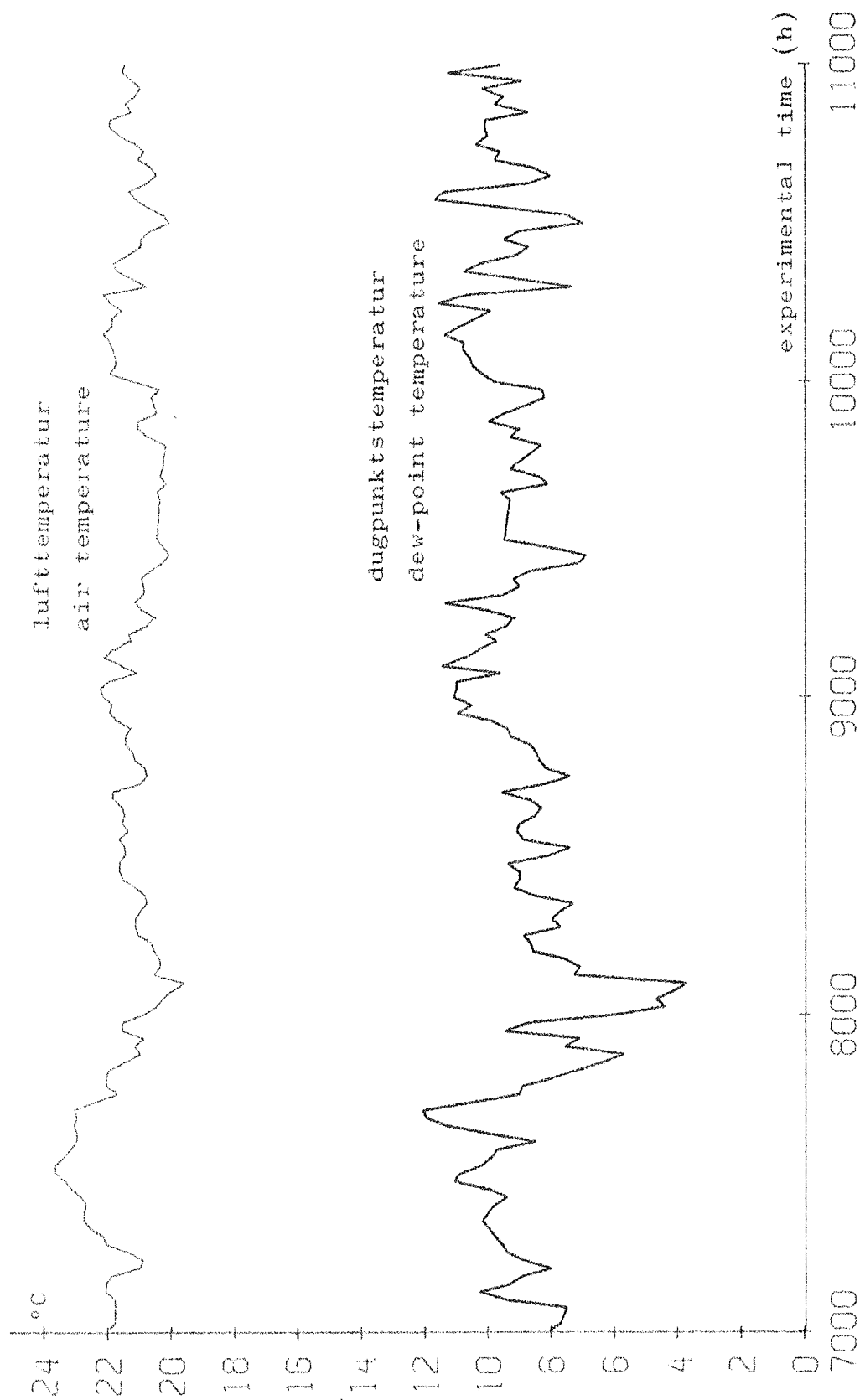


Fig. 6.10. Variationer i lufttemperatur og dugpunkt i lokalet, hvori forsøgsopstillingen er placeret, i afhængighed af den eksperimentelle tid (timer).

Variations in air temperature and dew-point in the room, where the test device is placed, versus the experimental time (hours).

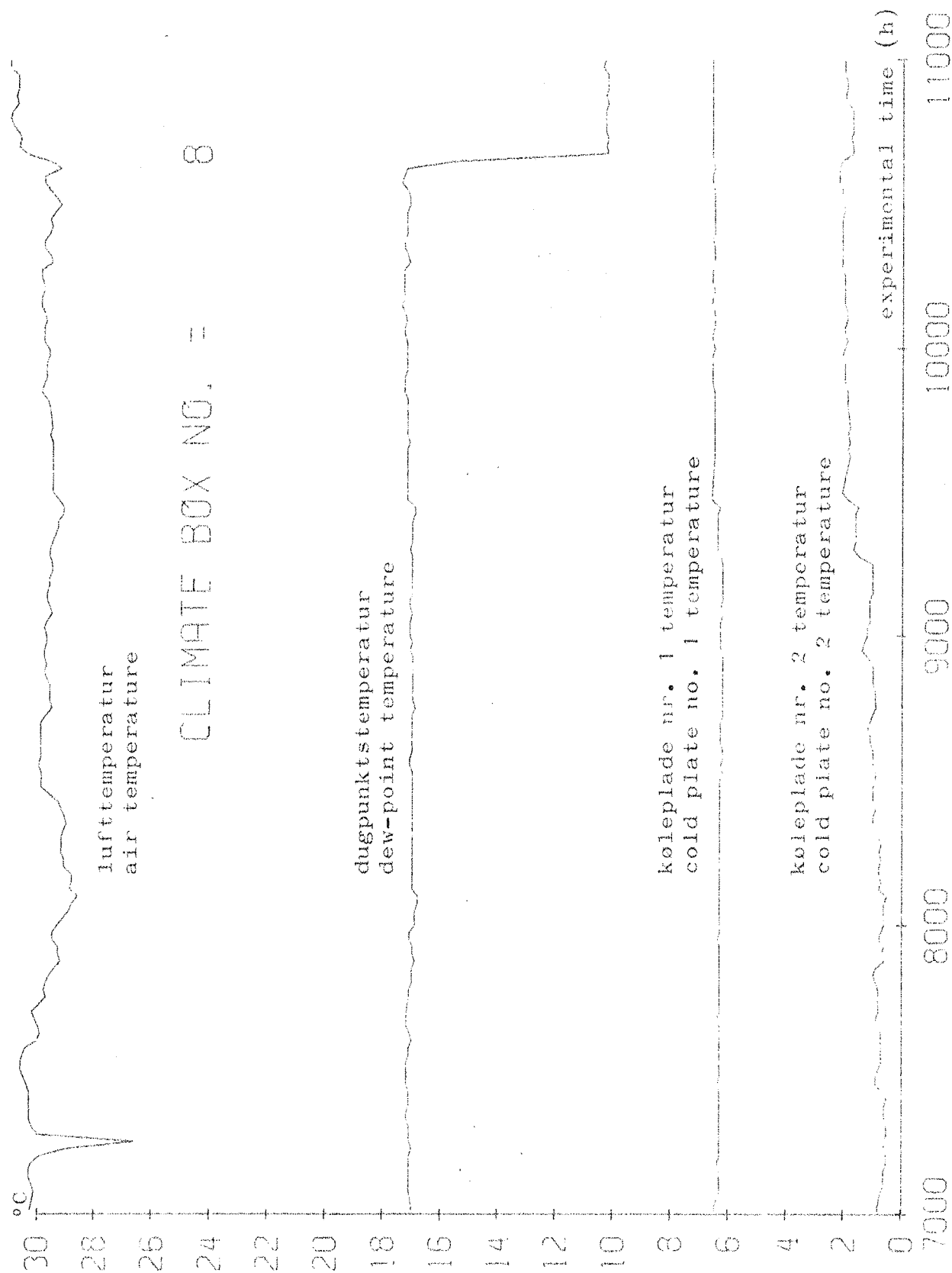


Fig. 6.11. Variationer af temperaturer i klimaskab nr. 8.  
Variations of temperatures in climate box no. 8.

Det optegnede temperaturforløb for klimaskabet viser variationerne i lufttemperatur, dugpunkt og kølevæsken (i dette tilfælde nr.1), som ledes til forsøget. Der har været fejl i mængden af vand i termostatbadet, der holder lufttemperaturer til ca. 7200 h. Herved bliver varmelegemet afbrudt, og temperaturen falder til ca.  $24^{\circ}\text{C}$ . Dette afspejles også i prøvelegemets temperatur.

Desuden er temperaturfordelingen i prøvelegemet målt, se fig 6.12. Det ses, at temperaturerne har en svagt faldende tendens svarende til, at varmeisoleringssevnen forringes, når fugtindholdet stiger.

Temperaturfordelingen i prøvelegemet ved ligevægtstilstanden er næsten retlinet, idet en tilnærmet ret linie med mindre afvigelse end  $0,05^{\circ}$  giver det samme som er målt:

højder [mm]	49	38	27	16	5
temperaturer [ $^{\circ}\text{C}$ ]	9,6	11,9	14,3	16,5	18,8

Eventuelle variationer fra det retlinede forløb kan skyldes dels  $\lambda$ -værdiens afhængighed af fugtindholdet og dels placeringen af termoelementerne. Det er dog muligt ved brug af røntgenfotografering af prøvelegemerne at bestemme, hvor termoelementerne ligger. Dette er dog ikke gjort.

Ud fra vejningerne kan middelfugtindholdets variation med tiden optegnes (fig. 6.13). Fugtindholdet skulle til slut nå en ligevægtstilstand, og dette sker også, idet det sidste stykke har en lille hældningskoefficient. Kurven er ikke helt vandret, men den ganske svage stigning, som konstateredes, kan skyldes dels  $\lambda$ -værdiens afhængighed af fugtindholdet, dels hysteresen fra tilfældige variationer i temperatur og fugtighed. Da en forlængelse af forsøget ikke kunne forventes at medføre væsentlig ændrede resultater, blev forsøget stoppet efter fem måneders forløb.



SPECIMEN NUMBER = 162  
 CLIMATE BOX NO. = 8  
 COLD PLATE NO. = 2

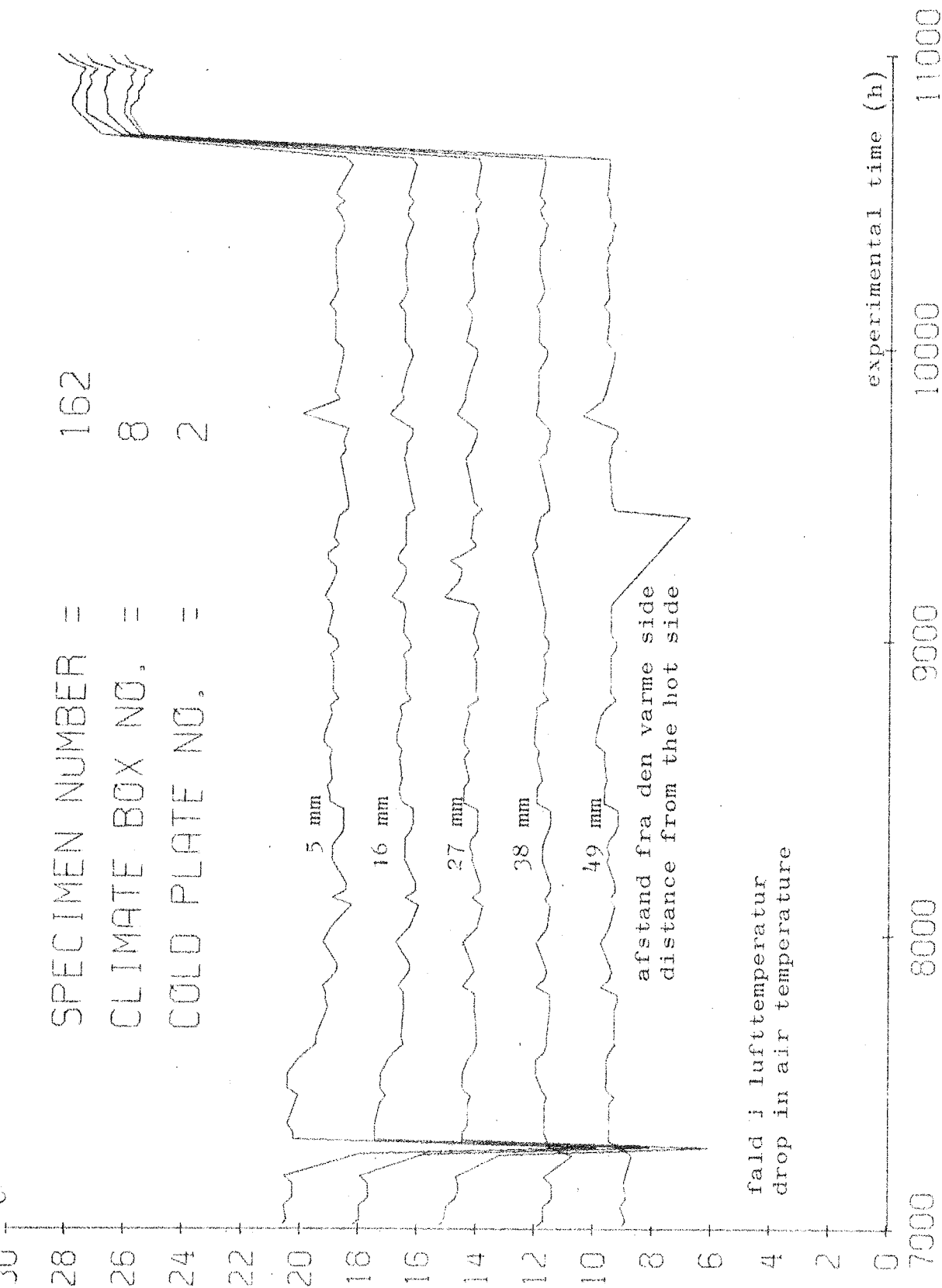


Fig. 6.12. Temperaturfordelingerne i prøvelegeme nr. 162 under kondensation.  
 Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.  
 Temperature distributions in specimen no. 162 during condensation.  
 The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

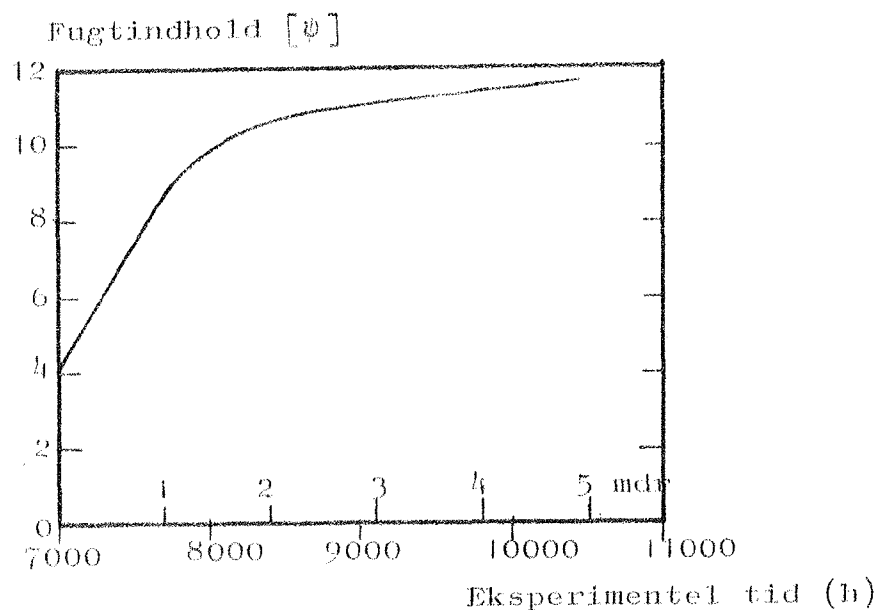


Fig. 6.13. Middelfugtindholdet i prøvelegeme nr.162 ved tagkondensationsforsøg.

Mean moisture content in specimen no.162 during roof condensation experiment.

Til forskellige tidspunkter er fugtindholdet målt med  $\gamma$ -transmissionsmåleudstyret. De målte værdier optegnes ved brug af EDB (fig.6.14) sammen med tilnærmede kurver for fugtfordelingerne i prøvelegemet. Den kolde side er til venstre på figuren, og her fås som ventet det højeste fugtindhold.

Når man ser på fugtophobningen, vil man bemærke, at kondensation først sker ved den kolde flade, og først efterhånden følger de andre lag efter. I sluttilstanden har lagene nærmest den kolde flade næsten samme fugtindhold.

Ved at afbilde fugtindholdet som funktion af tiden for hvert lag får man et billede af, hvordan fugten vandrer i prøvelegemet (fig.6.15). Det ses her, at lagenes fugtindhold altid (når man tager hensyn til usikkerheden fra  $\gamma$ -måleudstyret) stiger fra den varme til den kolde side. Det kan også konstateres, at det lag, der sidst ændrer sit fugtindhold, er det nederste, der vender mod den varme side.

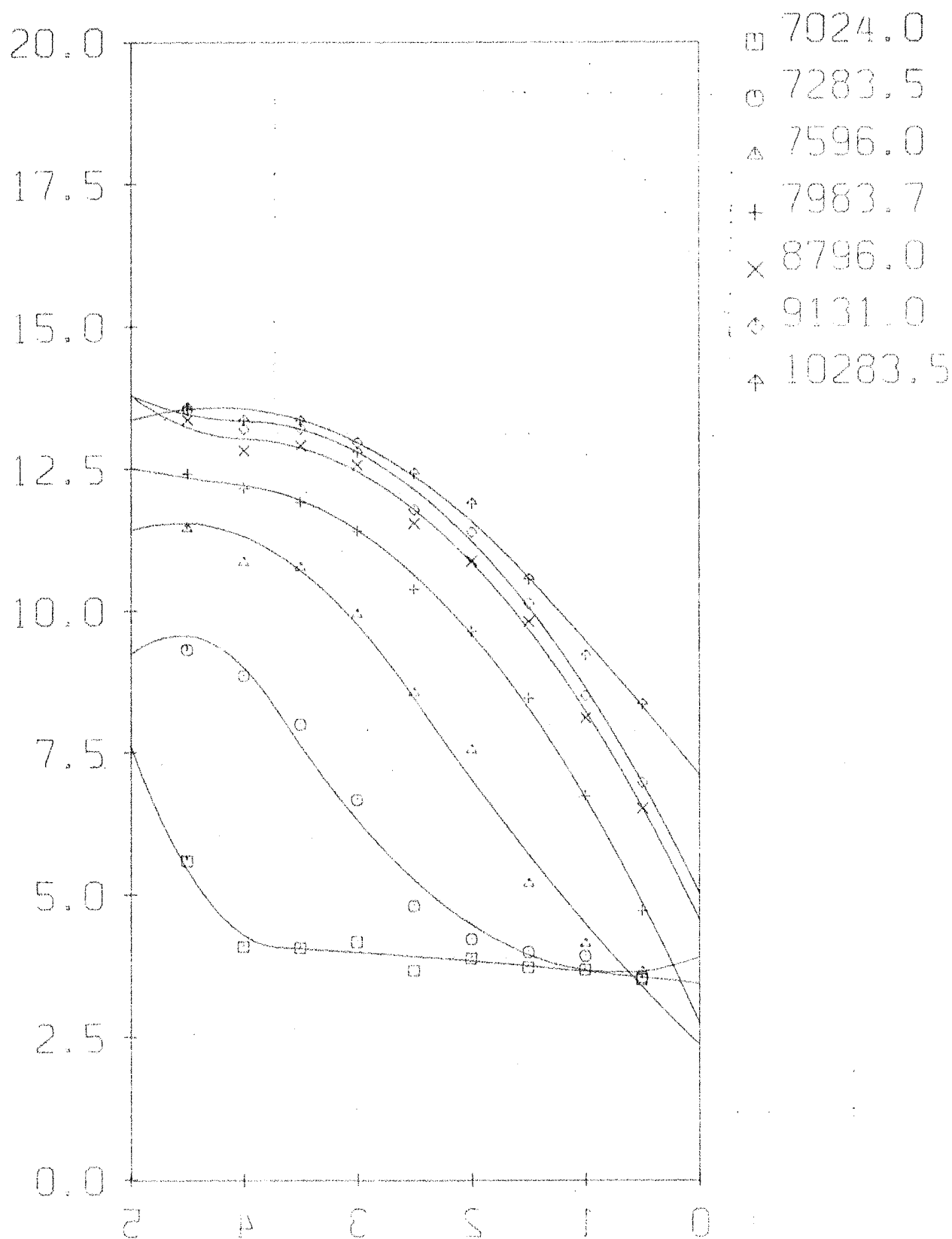


Fig. 6.14. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr.162 under tag-kondensationsforsøg. Fugtindhold (% vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den åbne (varme) side. Til højre symbolerne for de målte værdier og tilhørende eksperimentel tid (timer).

Moisture distributions in specimen no.162 during roof condensation experiment. Moisture content (% vol) versus distance (cm) from the open (warm) side. To the right the symbols of the measured values at the experimental time (hours).

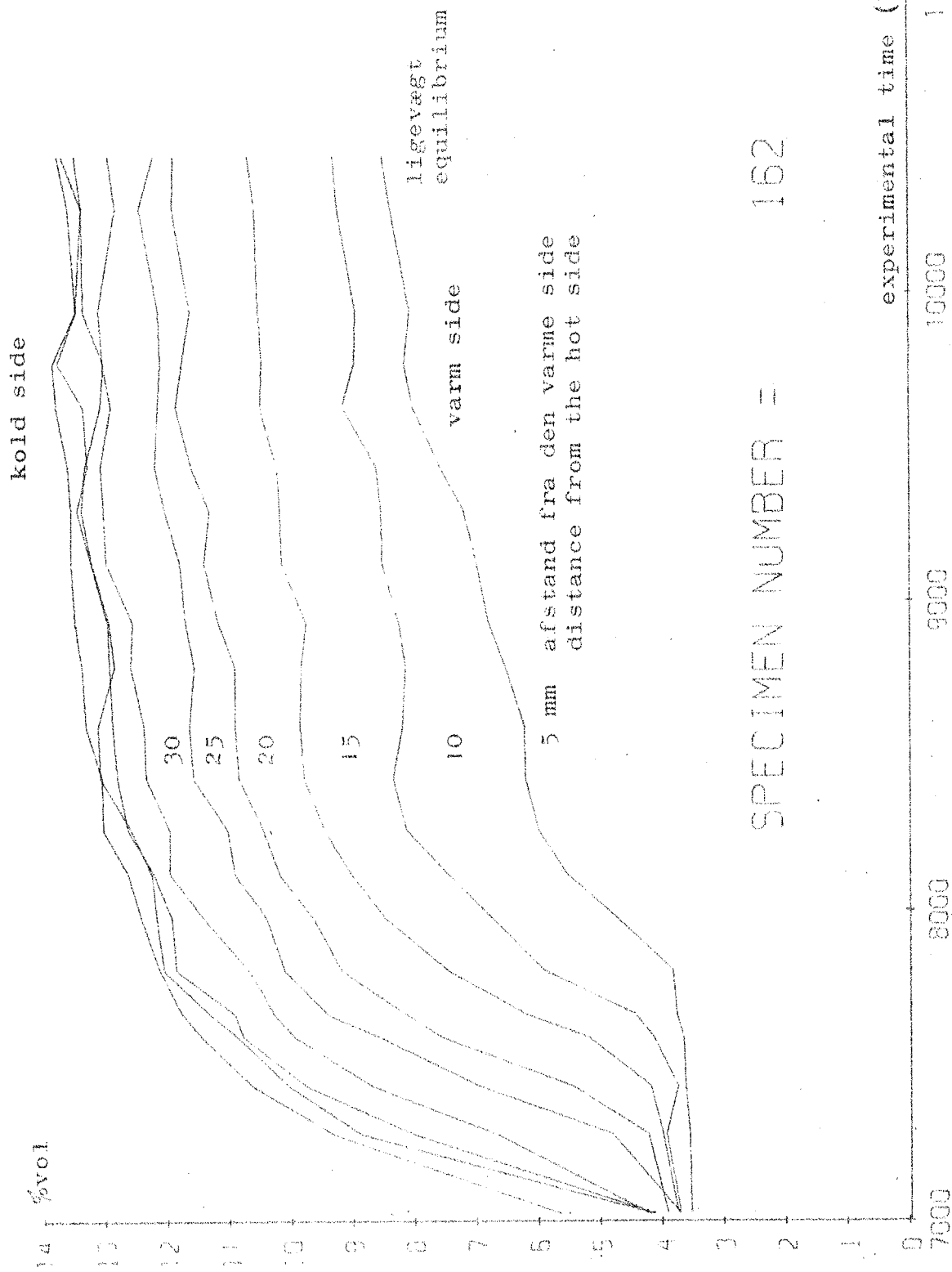


Fig. 6.15. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 162 under tagkondensationsforsøg. Kurverne er blevet tegnet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Moisture distributions in specimen no. 162 during roof condensation experiments. The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

SPECIMEN NUMBER = 162

Ændringen må skyldes  $\lambda$ -værdiens ændring med fugtindholdet, der vil medføre lavere temperatur i dette lag og dermed højere relativ fugtighed.

Havde prøvelegemets tykkelse været større, er det sikkert, at ændringen af fugtindholdet i det nederste lag ville være mindre, idet overgangsmodstanden for varme med 5 cm prøvelegemer er en meget væsentlig del af den totale varmemodstand.

Fra ligevægtstilstanden kan forholdet mellem kapillarledningstallet og termodiffusionstallet beregnes, da temperatur- og fugtfordelingen er kendt:

$$D \cdot \rho \cdot \text{grad } \psi + K \text{ grad } T = -g = 0$$

$$\varepsilon = \frac{K}{\rho D} = \frac{-\text{grad } \psi}{\text{grad } T} \quad \varepsilon = \varepsilon(\psi)$$

Beregningen udføres ved brug af målinger af temperatur- og fugtfordelingerne i det stationære tilfælde. Ved brug af polynomiske tilnærmelser findes grad  $\psi$  og grad  $T$  i ethvert punkt i prøvelegemet. Herefter kan temperaturgradientfaktoren (fig. 6.16) beregnes ved brug af EDB. Resultater viser en linie med  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-2}$  ved 10% vol og herefter hastigt faldende. Den lodrette liniedel ved ca. 12,5% vol skyldes, at grad  $\psi$  her er næsten lig 0, og derfor bliver  $\varepsilon$  meget lille.

#### 6.4.2. Kondensation i prøvelegeme nr. 170.

Dette forsøg blev udført ved høj relativ fugtighed, nær 100%. Dette bevirkede, at der efter en tid skete en meget voldsom fugtophobning i prøvelegemet som følge af enten direkte overfladekondensation eller kondensation i materialets lag nærmest overfladen.

Temperaturmålinger i klimaskabet (fig. 6.17) giver en lufttemperatur på ca. 30°C og et dugpunkt på ca. 17°C. Den kolde plades temperatur lå omkring 1°C. Til tidspunktet

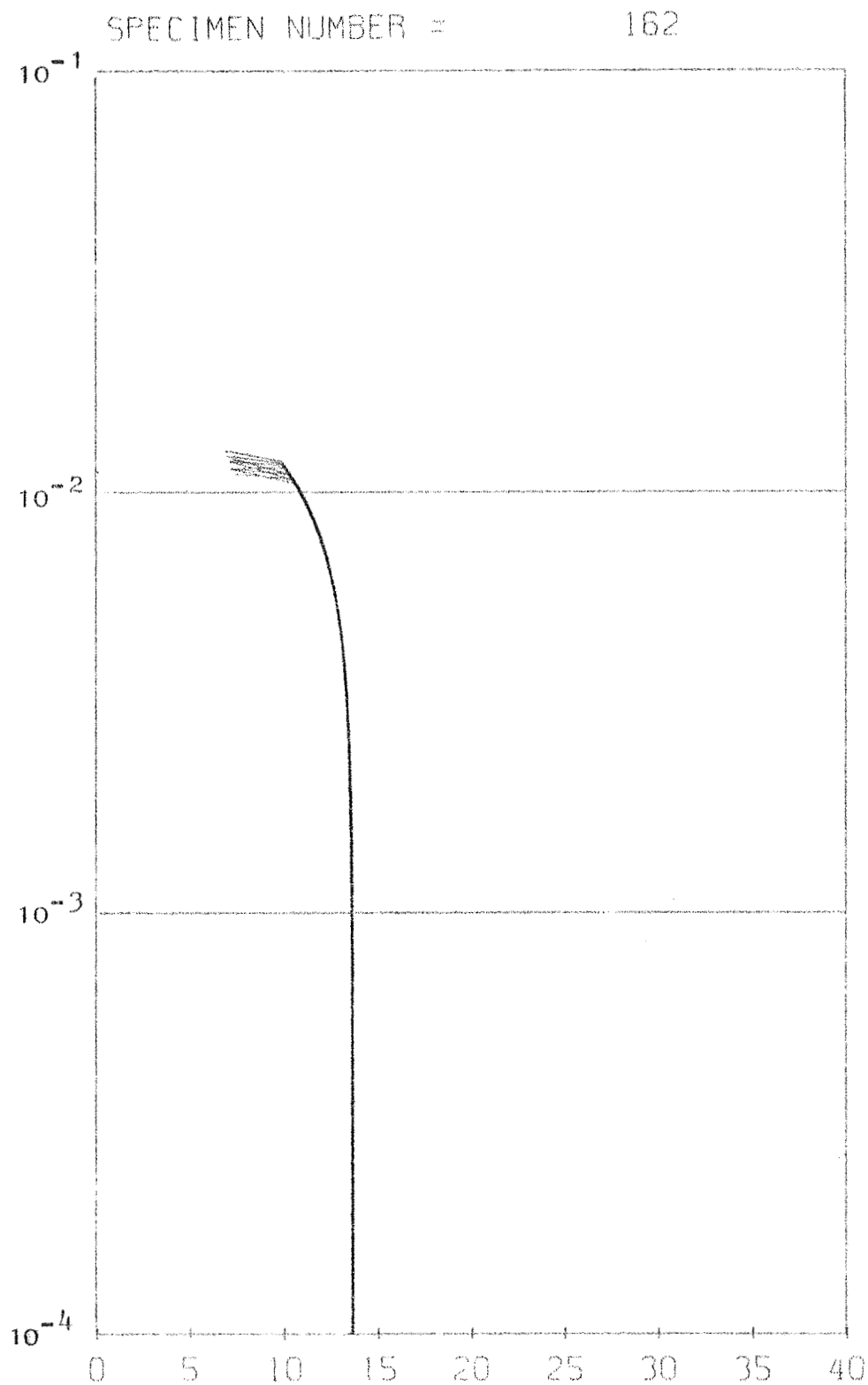


Fig. 6.16. Beregnet temperaturgradientfaktor ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )  
i afhængighed af fugtindholdet (% vol) for  
tagkondensationsforsøg med prøvelegeme nr.162.  
Calculated temperature gradient factor ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )  
versus moisture content (% vol) from roof  
condensation experiment on specimen no.162.

CLIMATE BOX NO. 8

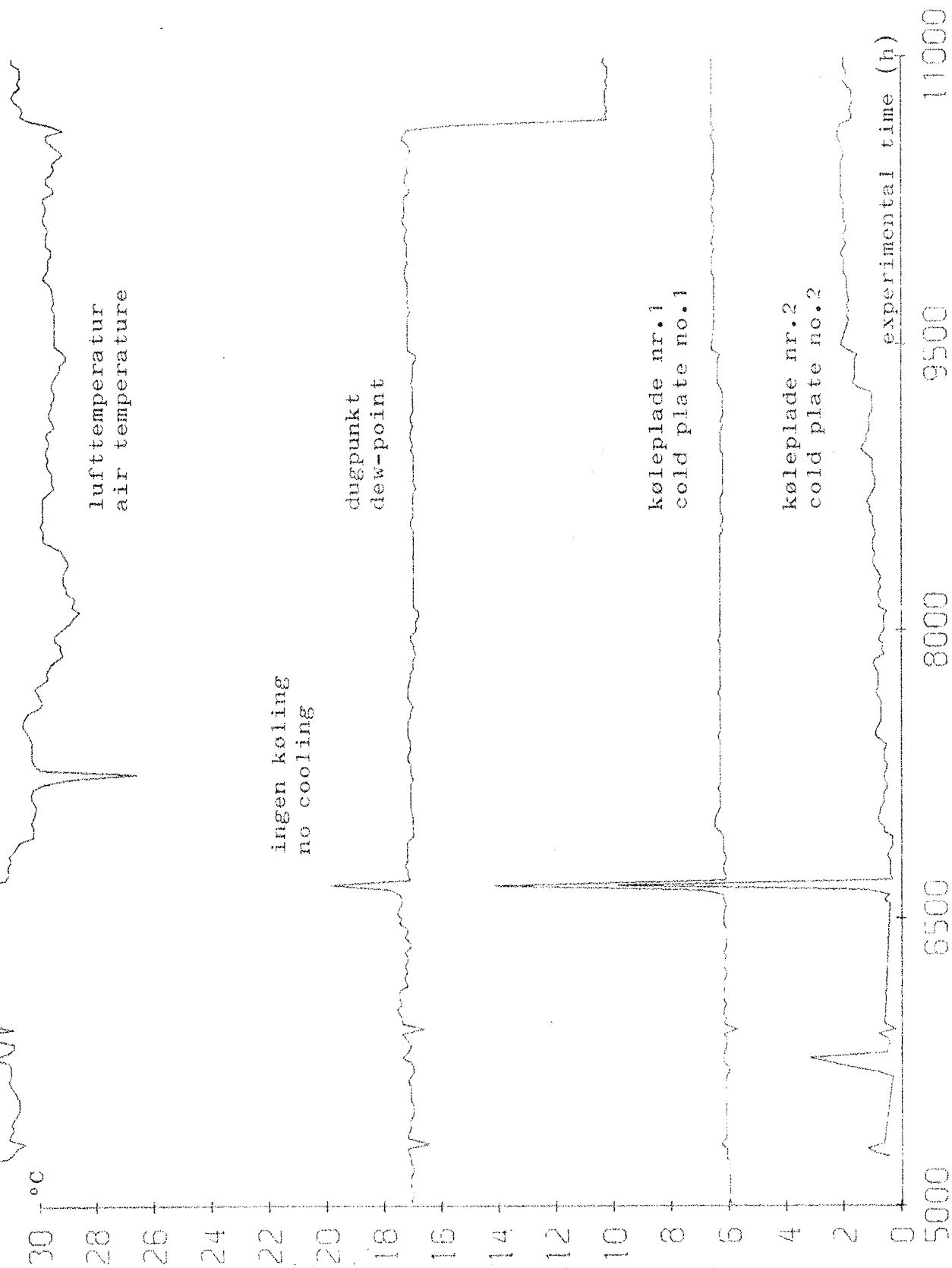


Fig. 6.17. Variations of temperatures i klimaskab nr. 8.  
Variations of temperatures in climate box no. 8.

6680 h har der været en alvorlig fejl på forsyningen af kølevæske, hvilket kan konstateres både på temperatur- og fugtmålingerne i prøvelegemet. Udbedringen af denne fejl har medført, at lufttemperaturen efter igangsætningen af køleforsyningen blev ca.  $2^{\circ}\text{C}$  lavere.

Temperaturerne i prøvelegemet under forsøget (fig. 6.18) afspejler tydeligt en række uheld under forsøget. Det ses iøvrigt meget tydeligt, at  $\lambda$ -værdien er afhængig af fugtindholdet, idet temperaturdifferensen mellem øverste og nederste termoelement ved starten er ca.  $15^{\circ}\text{C}$  og ved forsøgets slutning ca.  $8^{\circ}\text{C}$ . Sammenligner man dugpunktet (ca.  $17^{\circ}\text{C}$ ) med temperaturen 5 mm fra overfladen af prøvelegemet, fås, at allerede ved tiden 7000 h vil der ske kondensation meget tæt ved overfladen. Det fremgår også af fig. 6.20, at overfladelagets fugtindhold fra tiden 7000 h stiger hurtigere end før.

Fugtfordelingerne (fig. 6.19) viser i begyndelsen samme tendens som prøvelegeme nr. 162 med højest fugtindhold ved den kolde side (til venstre på figuren). Senere viser fugtindholdet sig at blive nærmest konstant i området 20-32% vol. Det konstante fugtindhold må skyldes, at kapillarsugningen lige kan holde ligevægt med kondensationen. Det er bemærkelsesværdigt, at ved udtørningsforsøg fås konstant fugtindhold ved nøjagtigt samme niveau. Der er nok ingen tvivl om, at forklaringen må søges i porestrukturen. Når fugtindholdet (fig. 6.20) passerer de 30% vol, ser man, at kondensationen nu sker i overfladelaget (på den varme side). Når kapillarsugningen og temperaturdifferensen ikke kan få de øvrige lag til at øge fugtindholdet, må det skyldes, at luften ikke kan nå at slippe ud af porerne. Samme fænomen kan iagttages ved op-sugning fra en fri væskeoverflade (omtales i appendix A), idet fugtindholdet stiger meget langsomt over de 30% vol på grund af netop dette forhold.



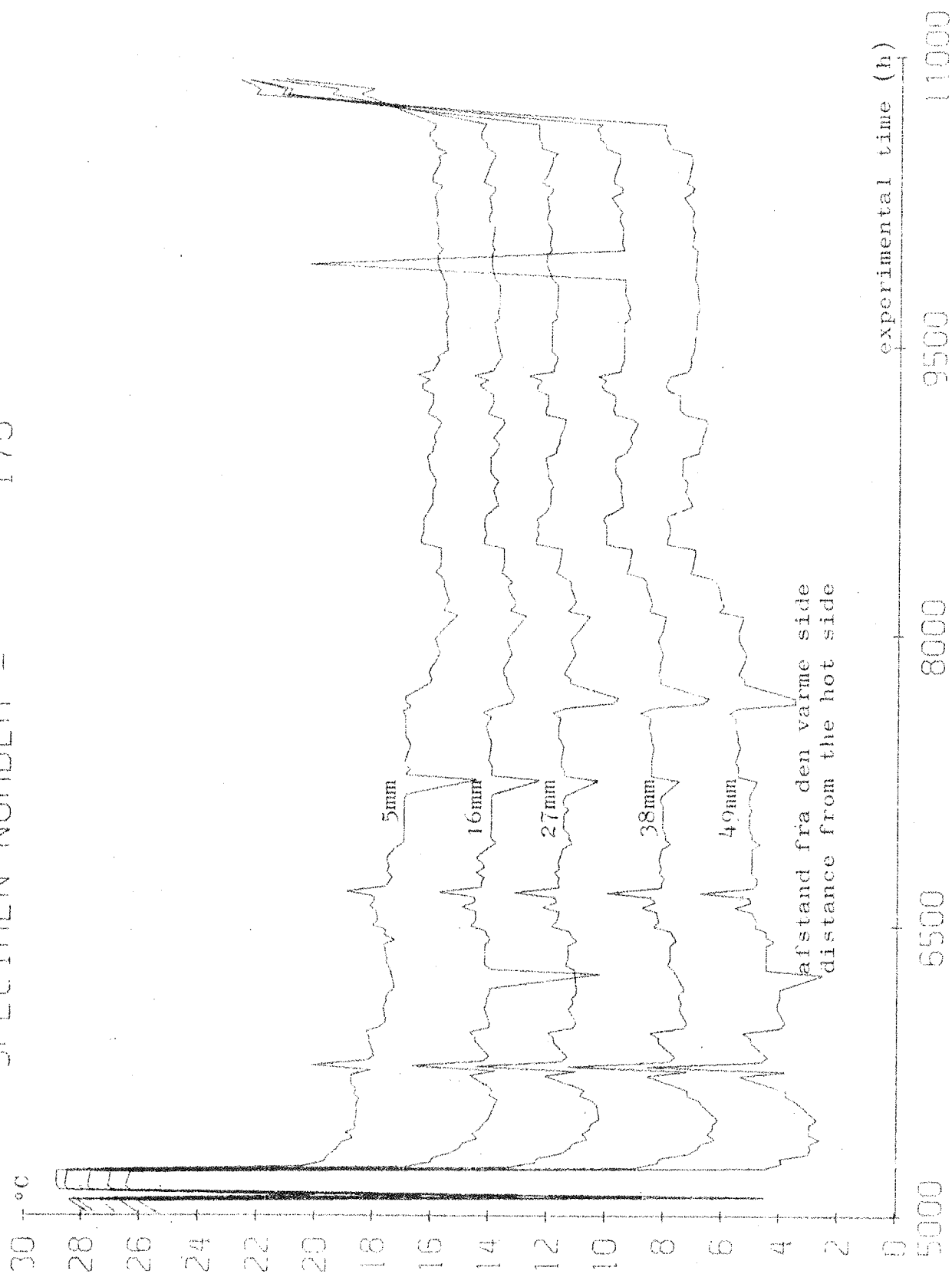


Fig. 6.18. Temperaturfordelingerne i prøvelegeme nr. 170 under kondensation. Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Temperature distributions in specimen no. 170 during condensation. The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

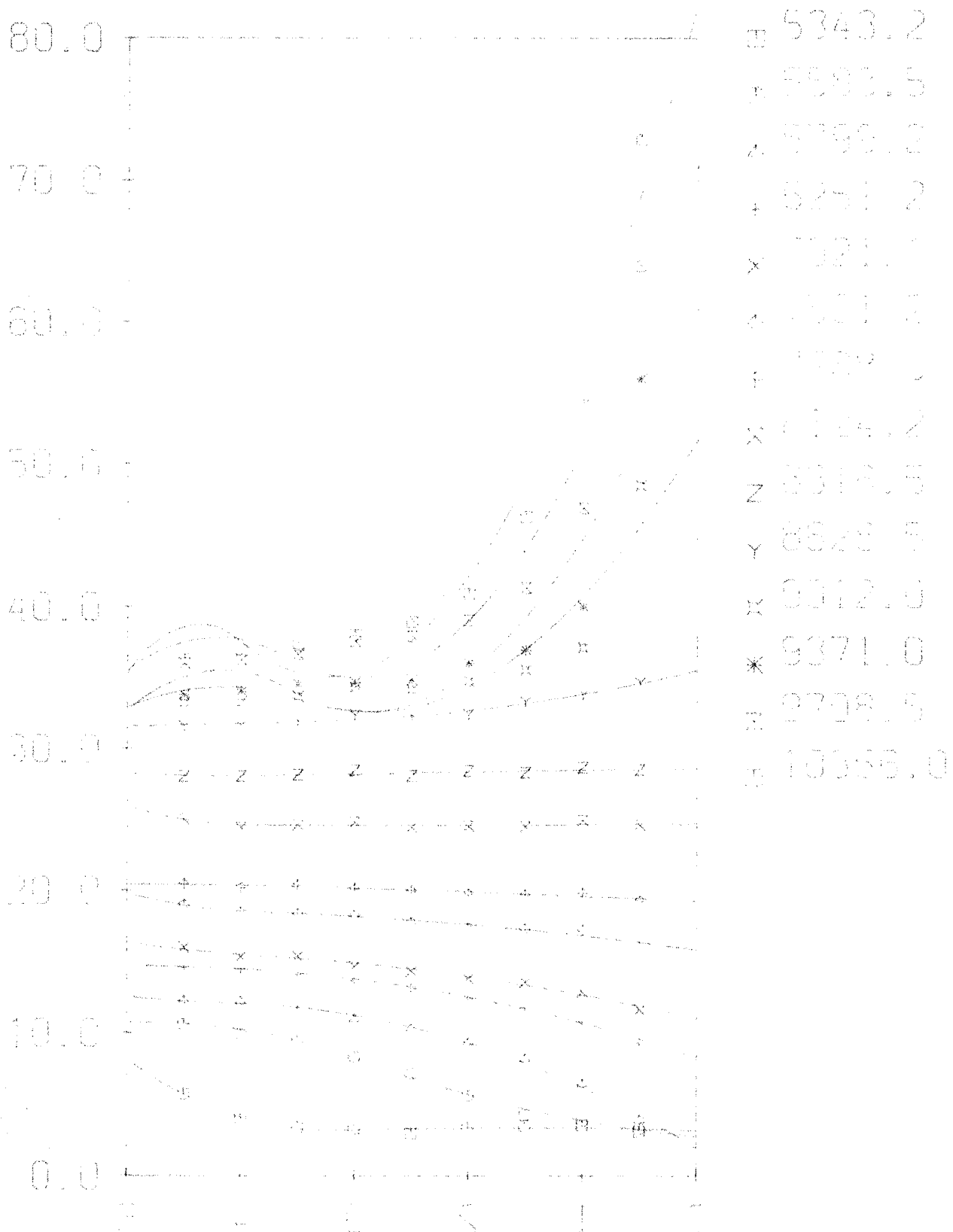


Fig. 6.19. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr.170 under tagkon-  
densationsforsøg. Fugtindhold (% vol) i afhængighed  
af afstanden (cm) fra den åbne (varme) side. Til  
højre symbolerne for de målte værdier og tilhørende  
eksperimentel tid (timer).

Moisture distributions in specimen no.170 during  
roof condensation experiment. Moisture content (% vol)  
versus distance (cm) from the open (warm) side.  
To the right the symbols of the measured values at  
the experimental time (hours).

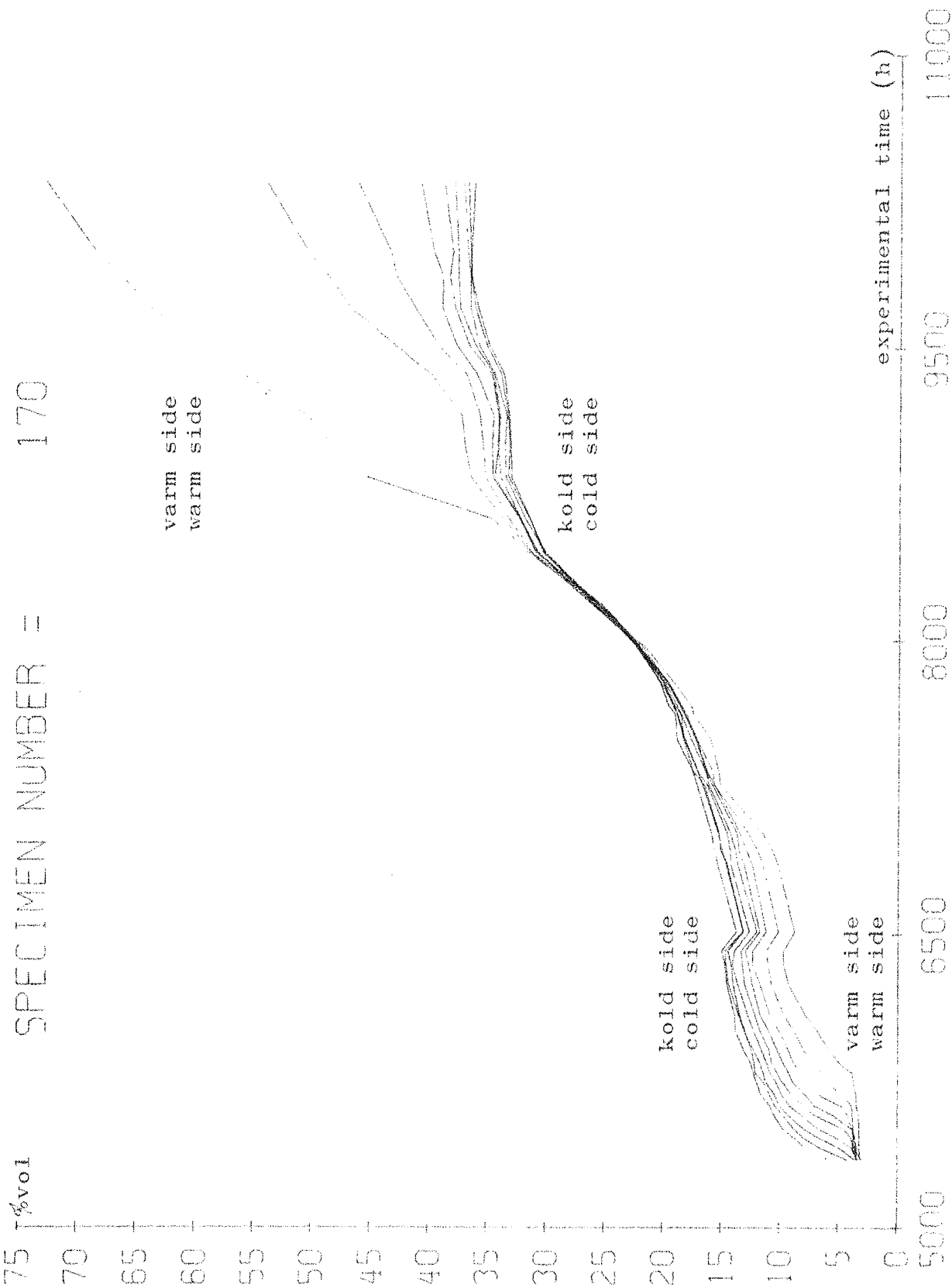


Fig. 6.20. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 170 under tagkondensationsforsøg (overfladekondensation på den varme side). Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde.

Moisture distributions in specimen no. 170 during roof condensation experiment (surface condensation on the warm side). The curves have been plotted between values measured in the same height.

Dette forsøg er ikke kommet i ligevægt, men blev standset efter ca. 7 måneder. Skulle man vente på ligevægt, er det sandsynligt, at det ville vare år. Da der ikke er ligevægt, kan temperaturgradientfaktoren ikke beregnes.

#### 6.4.3. Kondensation i prøvelegeme nr. 156.

Forsøget er startet med et middelfugtindhold i prøvelegemet på 3% vol til tidspunktet 7550 h og fortsat indtil 10900 h. På fig. 6.21 ses temperatur og dugpunkt i klimaskabet samt den kolde plades temperatur. Den kolde plade viser en konstant stigende tendens fra  $-1^{\circ}\text{C}$  til  $+1^{\circ}\text{C}$  på grund af, at kølingen fra laboratoriets køleanlæg ændrer sig.

Temperaturfordelingen i prøvelegemet (fig. 6.22) viser nogle meget voldsomme svingninger for termoelementet i højden 38 mm fra den varme side. Dette skyldes, at termoelementet er blevet "sygt", sandsynligvis på grund af en dårlig lodning. Mod slutningen af forsøget virker det tilsyneladende godt nok igen.

Fugtfordelingerne (fig. 6.23) viser samme tendens som for prøvelegeme nr. 162 med kondensationszonen, der stiger ud fra den kolde side. Det kan i dette tilfælde tydeligt ses, at krumningen på fugtfordelingskurven ved den kolde side ændrer fortegn. Nøjagtigt det samme forhold kan findes ved teoretiske beregninger af fugtfordelingerne.

Optegningen af fugtindholdet i de enkelte lag (fig. 6.24) viser, at overfladelagene på den varme og kolde side er nær ligevægt (vandrette linier), mens den midterste part af prøvelegemet endnu har ændrede fugtindhold. Det blev trods dette besluttet at standse forsøget, idet det skønnedes, at beregningen af temperaturgradientfaktoren ville give næsten samme resultat som ved ligevægt. Den herved beregnede temperaturgradientfaktor fremgår af fig. 6.31.

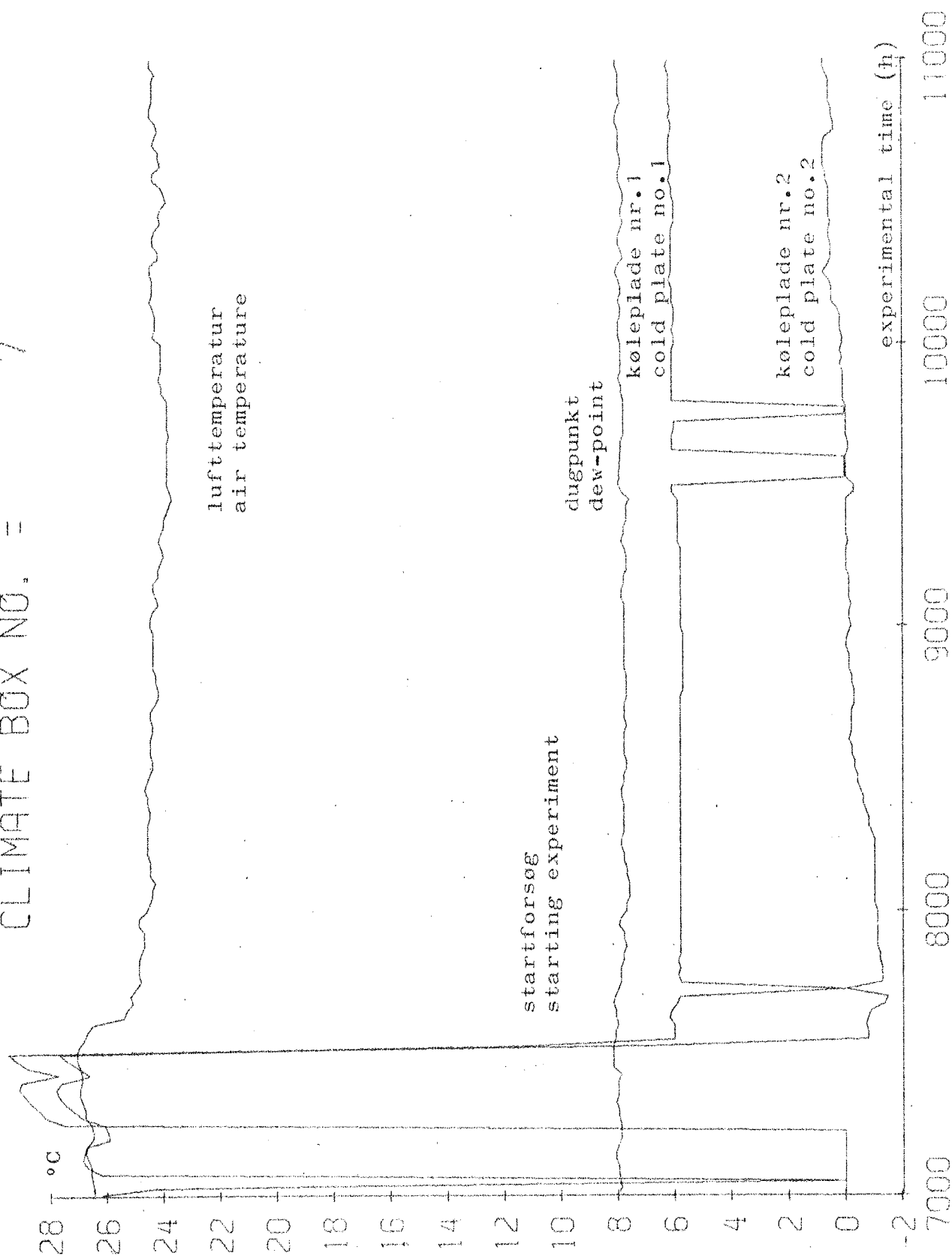


Fig. 6.21. Variations of temperature in klimaskab nr.7.

Variations of temperature in climate box no.7.

SPECIMEN NUMBER = 156  
 CLIMATE BOX NO. = 7  
 COLD PLATE NO. = 1

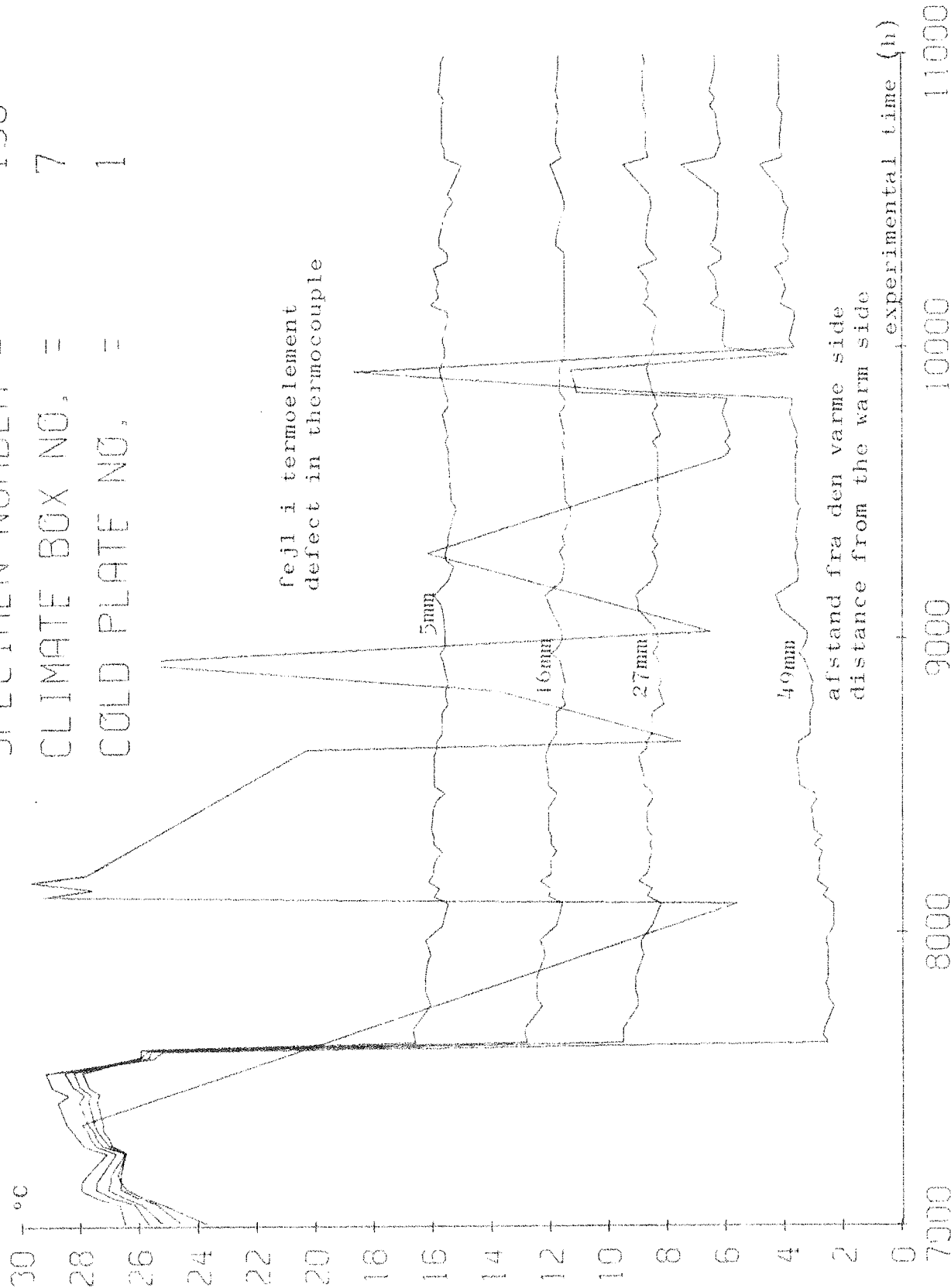


Fig. 6.22. Temperaturfordelingerne i prøvelegeme nr. 156 under kondensation. Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Temperature distributions in specimen no. 156 during condensation. The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

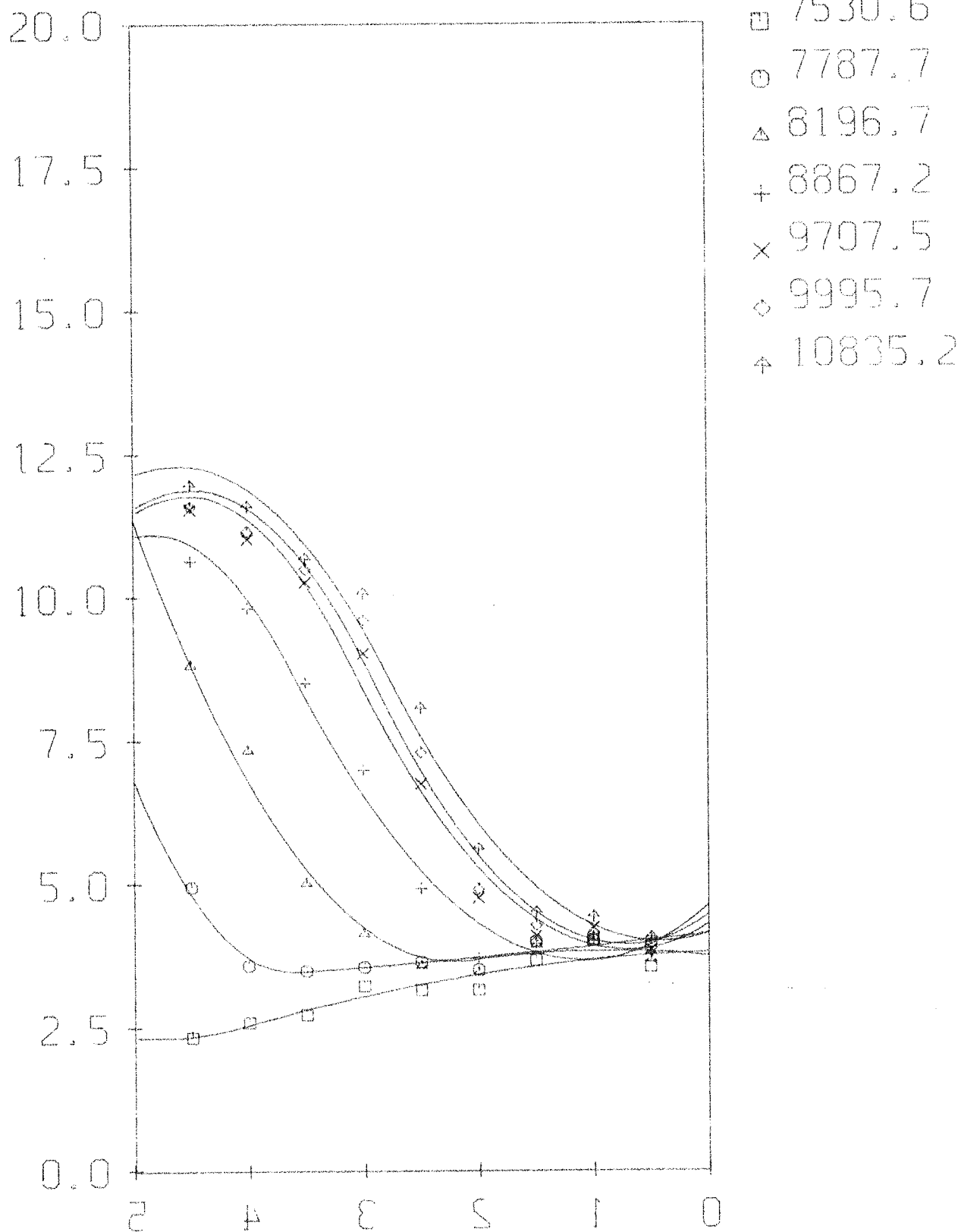


Fig. 6.23. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr.156 under tagkondensationsforsøg. Fugtindhold (% vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den åbne (varme) side. Til højre symbolerne for de målte værdier og tilhørende eksperimentel tid (timer).

Moisture distributions in specimen no.156 during roof condensation experiment. Moisture content (%vol) versus distance (cm) from the open (warm) side. To the right the symbols of the measured values at the experimental time (hours).

SPECIMEN NUMBER = 156



Fig. 6.24. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 156 under tagkondensationsforsøg. Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde.

Moisture distributions in specimen no. 156 during roof condensation experiment. The curves have been plotted between values measured in the same height.



#### 6.4.4. Kondensation i prøvelegeme nr. 163.

Temperatur og dugpunkt samt den kolde plades temperatur fremgår af fig. 6.21. Temperaturerne i prøvelegemet ses på fig. 6.25.

Fugtfordelingen fremgår af fig. 6.26 og 6.27. Der kan konstateres et ret stort område (3 cm af prøvelegemet), der har næsten konstant fugtindhold. Det forekommer, fordi forsøget er udført ved en lav relativ fugtighed ( $\sim 34\%$ ) i luften under taget og en høj temperatur ( $5^\circ\text{C}$ ) på tagfladen. Fig. 6.27 viser, at fugtindholdet stadigt stiger, men det skete så langsomt, at det blev besluttet at afbryde forsøget.

Ud fra denne slutttilstand er temperaturgradientfaktoren beregnet (fig. 6.31).

#### 6.5. Beregning af fugttransportkoefficienterne ud fra ikke-stationære tilstande

Ud fra teorien i afsnit 6.2. kan D, K og  $\epsilon$  beregnes, hvis man har et ikke-stationært forsøg, hvor temperaturfordelingen og fugtfordelingen er kendt i afhængighed af tiden, og en af de tre koefficienter kendes.

En beregning ud fra et forsøg med prøvelegeme nr. 161 har givet nogenlunde rimelige resultater. Prøvelegeme nr. 161 har ikke været omtalt tidligere, men resultaterne svarer ret nøje til prøvelegeme nr. 162, der er omtalt i afsnit 6.4.1., idet de har været underkastet samme klimabetingelser. Beregningen blev udført med kapillarledningstallet (D) kendt, idet dette er angivet af VAN DER KOOI [20] ud fra målinger på gasbeton. Ideen har i første omgang kun været at bruge en realistisk, kendt koefficient og derefter at beregne, om de øvrige koefficienter, der beregnes ved den ikke-stationære metode, kommer til at se realistiske ud.

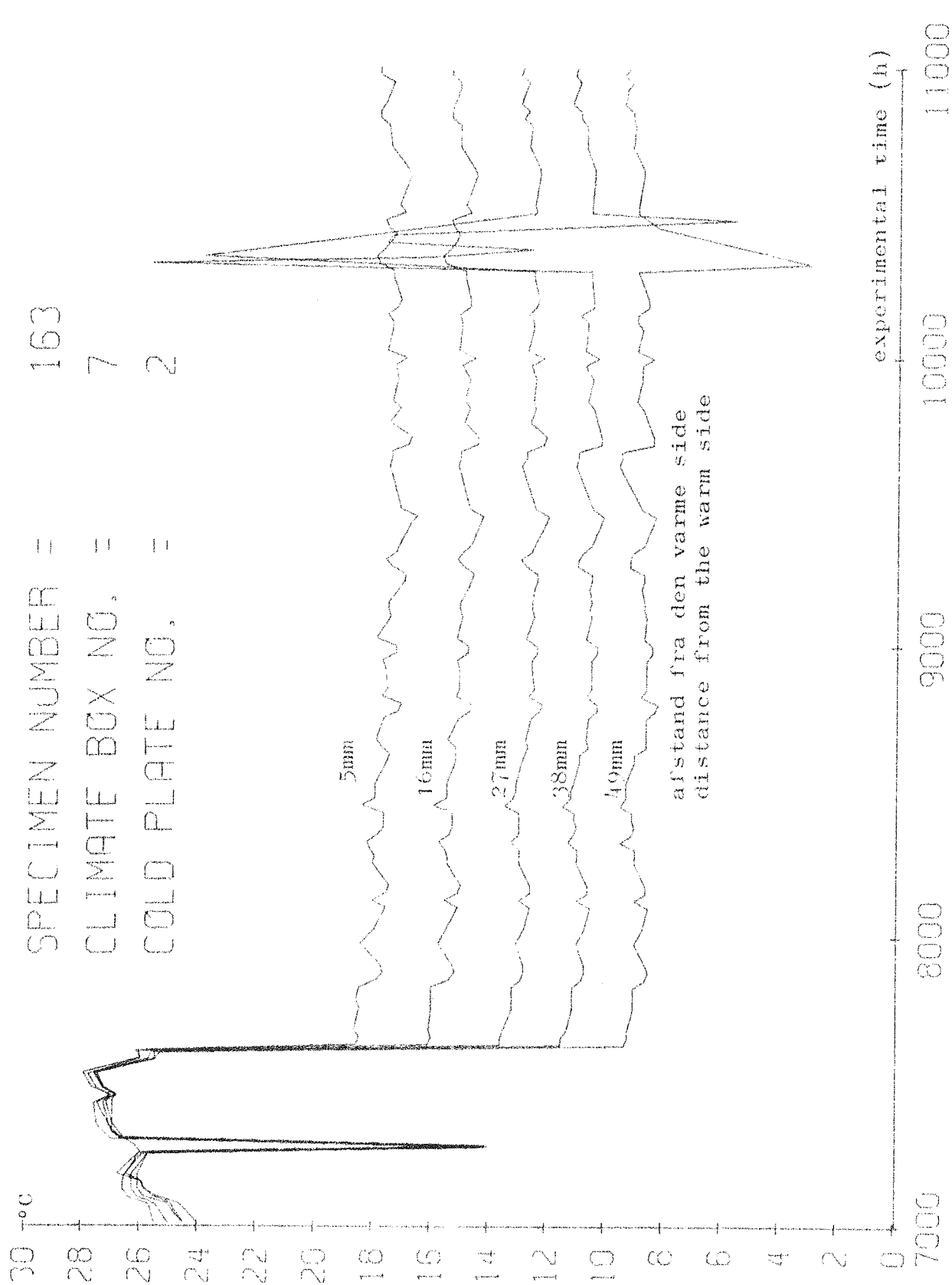


Fig. 6.25. Temperaturfordelingerne i prøvelegeme nr. 163 under kondensation. Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde i prøvelegemet.

Temperature distributions in specimen no. 163 during condensation. The curves have been plotted between values measured in the same height in the specimen.

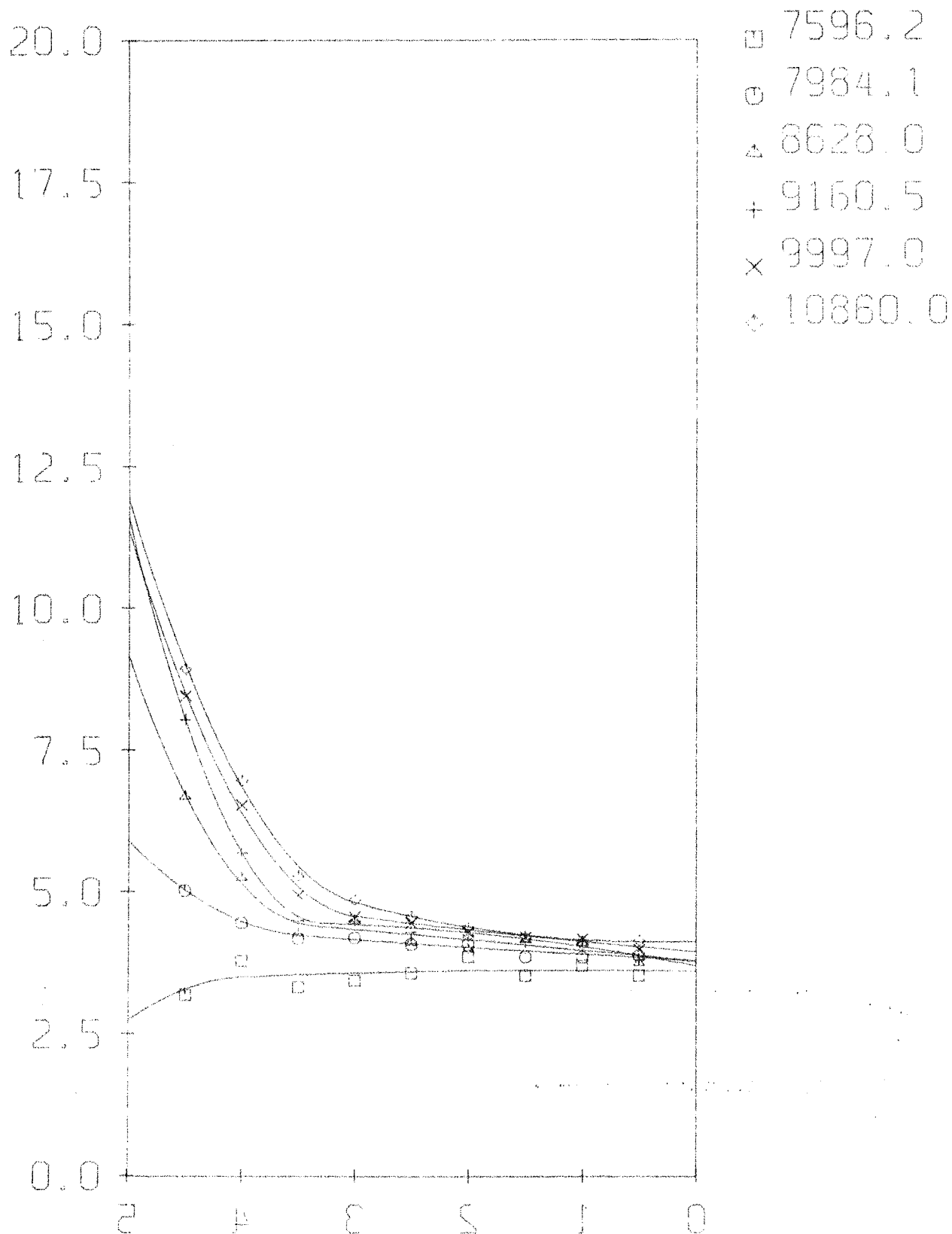


Fig. 6.26. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 163 under tagkondensationsforsøg. Fugtindhold (% vol) i afhængighed af afstanden (cm) fra den åbne (varme) side. Til højre symbolerne for de målte værdier og tilhørende eksperimentel tid (timer).

Moisture distributions in specimen no. 163 during roof condensation experiment. Moisture content (% vol) versus distance (cm) from the open (warm) side. To the right the symbols of the measured values at the experimental time (hours).

SPECIMEN NUMBER = 163

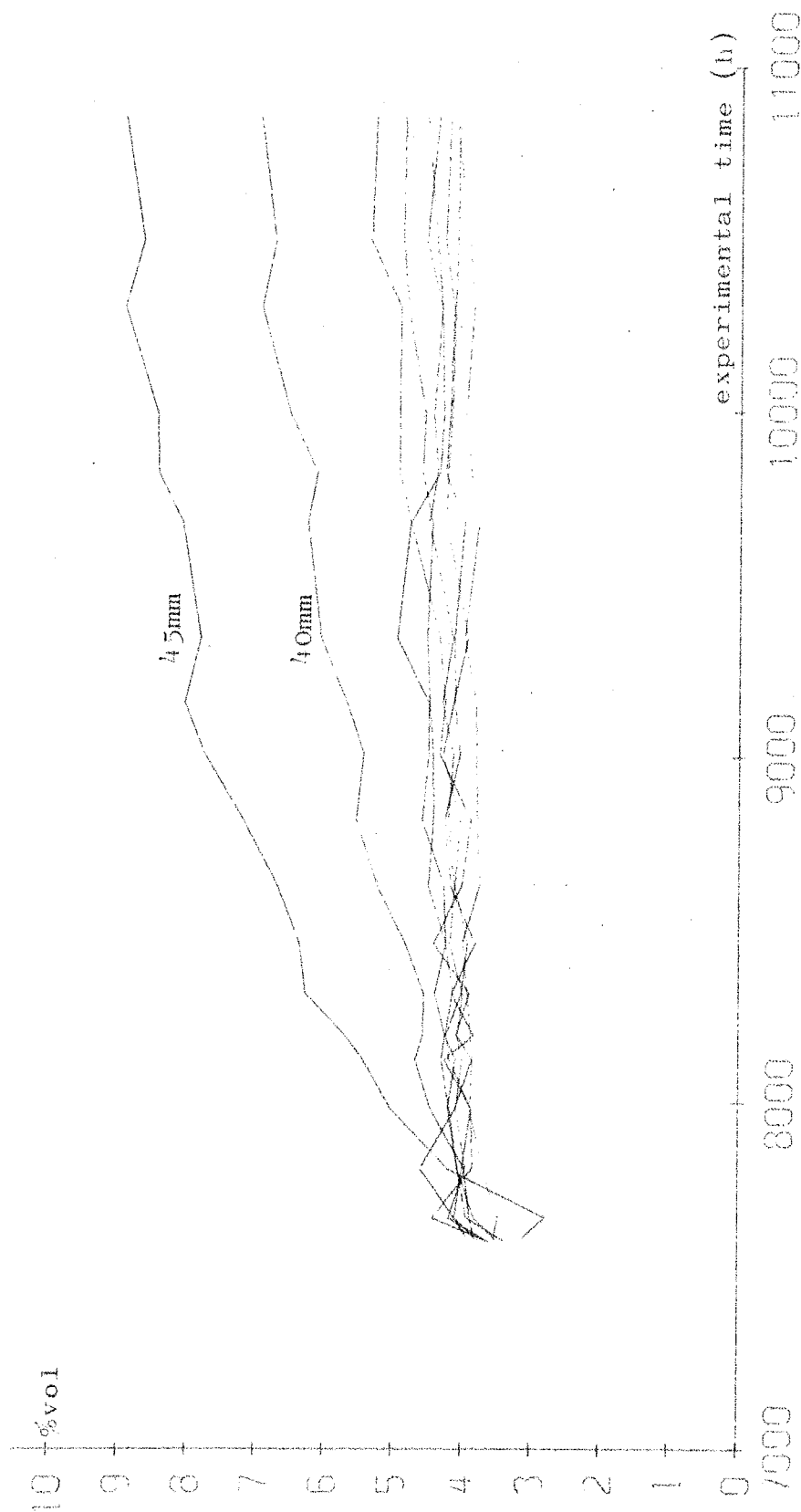


Fig. 6.27. Fugtfordelinger i prøvelegeme nr. 163 under tagkondensationsforsøg. Kurverne er tegnet gennem værdier målt i samme højde.

Moisture distributions in specimen no. 163 during roof condensation experiment. The curves have been plotted between values measured in the same height.

Fig. 6.28 viser det anvendte kapillarledningstal  $D = D(\psi)$ . Fig. 6.29 viser temperaturgradientfaktoren  $\epsilon = \epsilon(\psi)$ , som giver en værdi på ca.  $1 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ved 10% vol. En sammenligning med de ved forsøgene fundne temperaturgradientfaktorer (fig. 6.31) viser en udmærket overensstemmelse. Fig. 6.30 viser termodiffusionstallet  $K = K(\psi)$ , som har et maksimum ved ca. 7% vol på ca.  $7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m h } ^\circ\text{K}$ . VAN DER KOOI har beregnet termodiffusionstallet ved 10% vol til  $7,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m h } ^\circ\text{K}$ , som svarer godt til værdien på fig. 6.30. KOOI har til gengæld intet maksimum ved 7% vol.

Det er givet, at bestemmelsen er behæftet med en ret stor usikkerhed, men ved brug af mange forsøg med tilhørende beregninger og anvendelsen af statistik må man kunne få noget ud af disse sammenhænge.

Det er ved udledningen forudsat, at koefficienterne kun er afhængige af fugtindholdet, men det er muligt, at andre forhold, f.eks.  $T$  og grad  $\psi$  har betydning. Dette vil kræve en statistisk analyse af resultaterne. Da alle resultater findes på bulkort, er det ikke helt uoverkommeligt, men undersøgelsen er ikke foretaget.

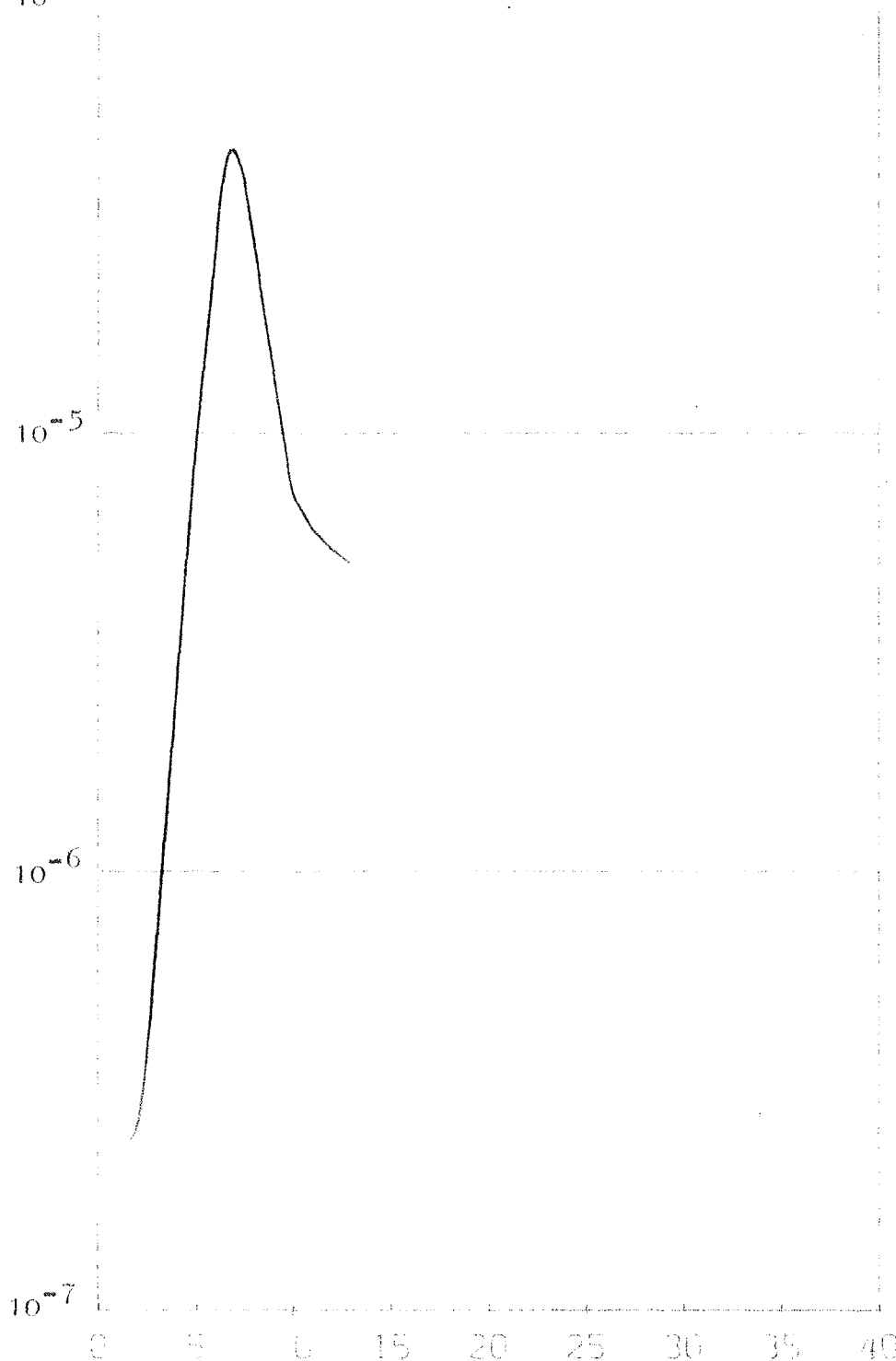


Fig. 6.28. Kapillarledningstallet [ $m^2/h$ ] for gasbeton i afhængighed af fugtindholdet [% vol]. Værdier fra VAN DER KOOI [20]. Denne kurve samt det ikke-stationære temperatur- og fugtforløb for tagkondensationsforsøget med prøvelegeme nr.161 anvendes til beregning af temperaturgradientfaktoren (fig.6.29) og termodiffusionstallet (fig.6.30).

Moisture diffusivity [ $m^2/h$ ] for cellular concrete versus moisture content [% vol]. Values from VAN DER KOOI [20]. This curve and the non-stationary temperature- and moisture transfer of the roof condensation experiment on specimen no.161 are used for calculation of the temperature gradient factor (fig.6.29) and the thermal moisture conductivity (fig.6.30).

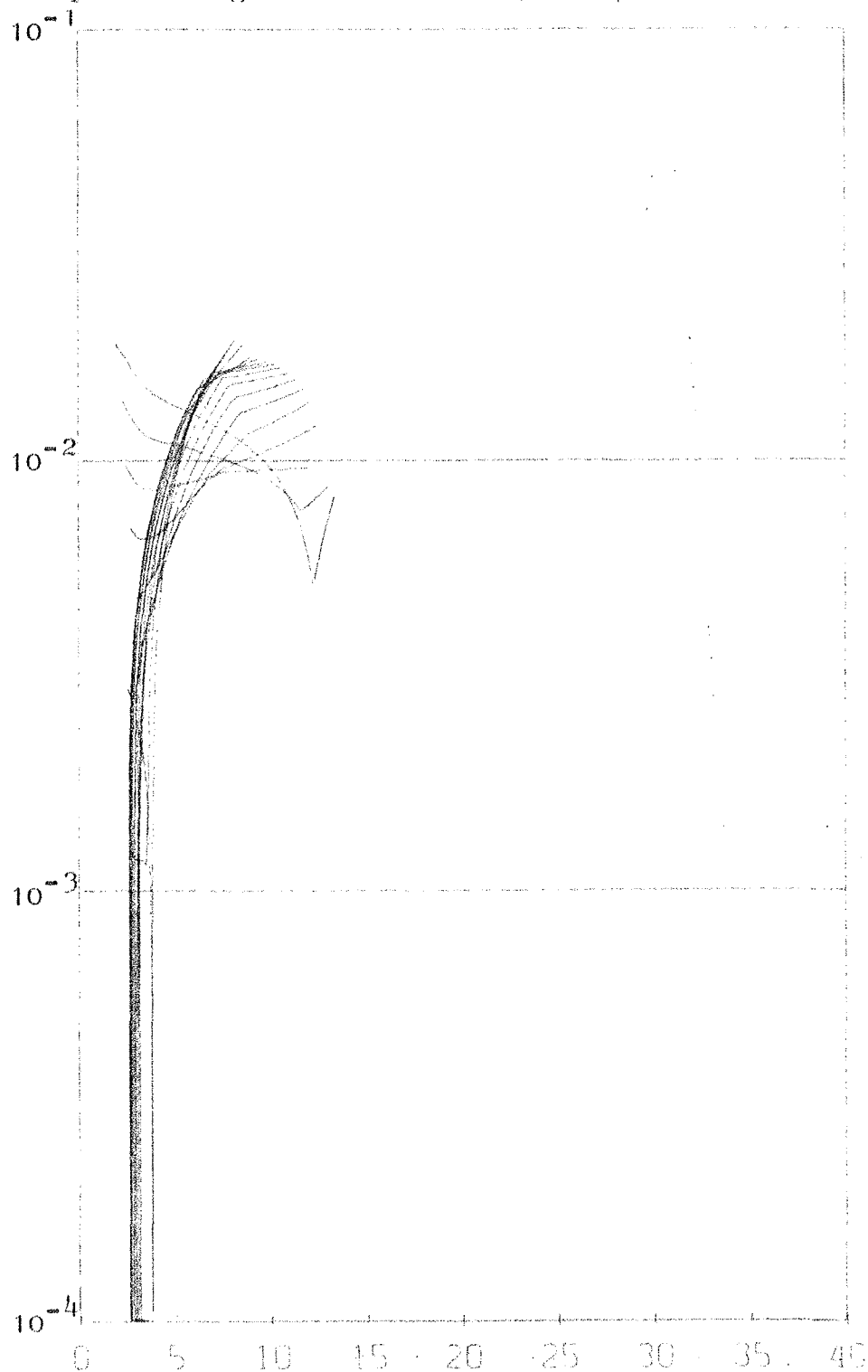
Temperature gradient factor [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ]

Fig. 6.29. Temperaturgradientfaktoren [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ] for gasbeton i afhængighed af fugtindholdet [%vol]. Beregnet fra ikke-stationært tagkondensationsforsøg med prøvelegeme nr.161 samt kapillarledningstallet (fig.6.28).

Temperature gradient factor [ $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ] for cellular concrete versus moisture content [%vol]. Calculated from non-stationary roof condensation experiment on specimen no.161 and the moisture diffusivity (fig.6.28).

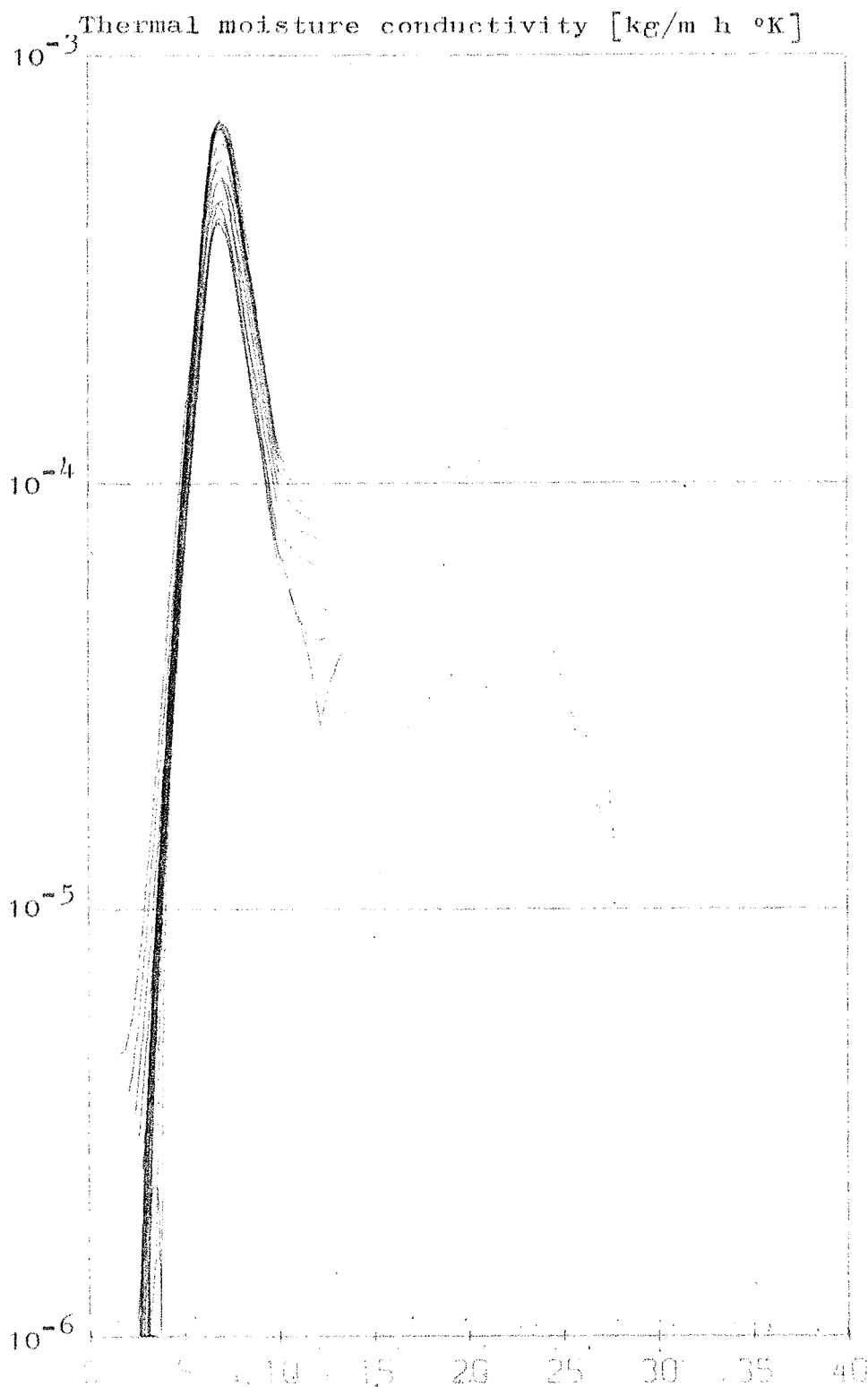


Fig. 6.30. Termomodiffusionstallet  $[\text{kg/m h } ^\circ\text{K}]$  for gasbeton i afhængighed af fugtindholdet  $[\% \text{vol}]$ . Beregnet fra ikke-stationært tagkondensationsforsøg med prøveprøvelegeme nr.161 samt kapillarledningstallet (fig.6.28).

Thermal moisture conductivity  $[\text{kg/m h } ^\circ\text{K}]$  for cellular concrete versus moisture content  $[\% \text{vol}]$ . Calculated from non-stationary roof condensation experiment on specimen no.161 and the moisture diffusivity (fig.6.28).



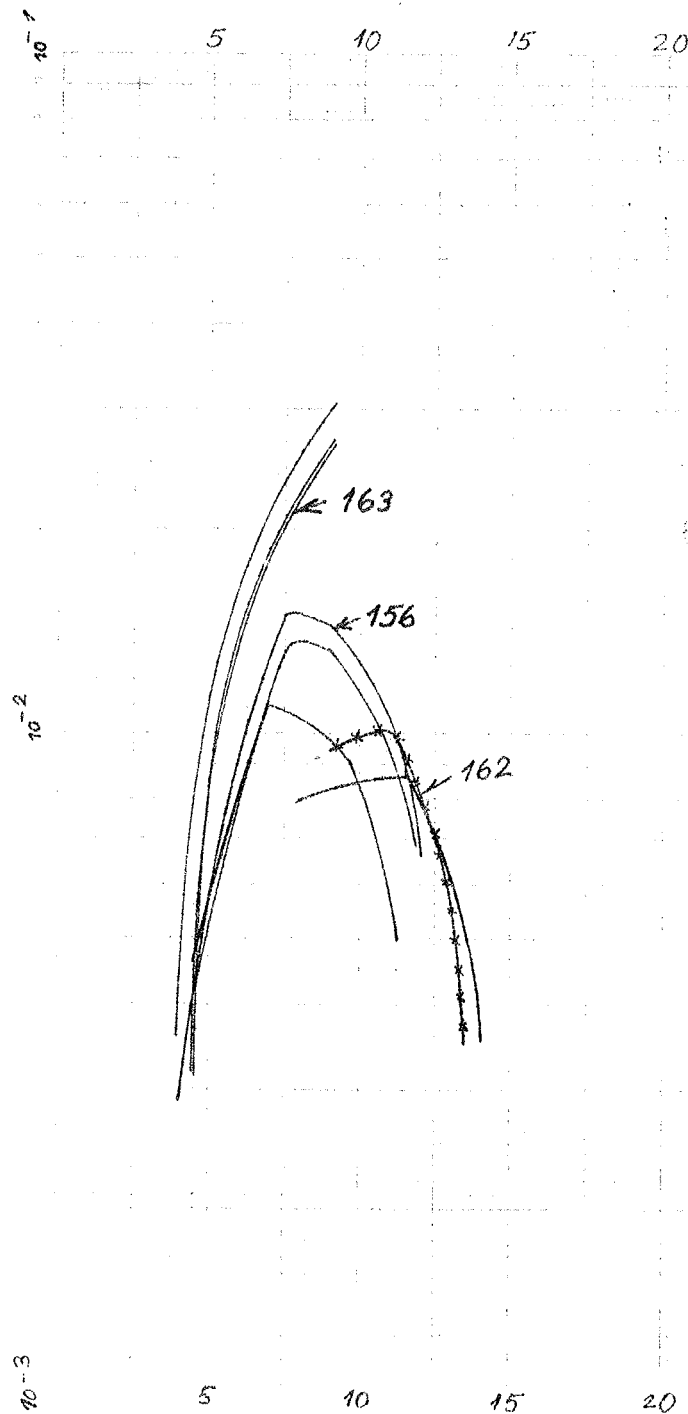


Fig.6.31. Temperaturgradientfaktorer beregnet fra ligevægt i tage af gasbeton. Hver kurve repræsenterer et forsøg. Faktoren ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ) (log-skala) i afhængighed af fugtindholdet (%vol).

Temperature gradient factor calculated from equilibrium in roofs of cellular concrete. Each curve represents one experiment. The factor ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ) (log-scale) versus moisture content (%vol).

## 6.6. Sammenligning med tidligere resultater

Resultaterne af de her udførte beregninger af temperaturgradientfaktoren, som er udført på grundlag af fugt- og temperaturfordelingen ved hvert forsøgs afslutning, ses på fig. 6.31. Resultaterne udviser en vis spredning, men hver gruppe på 3 forsøg under ensartede temperatur- og fugtforhold har næsten samme kurveform. Ser man i første omgang bort fra kurveskaren, hvortil nr. 163 hører, er der et tydeligt maksimum for temperaturgradientfaktoren ( $\epsilon$ ) ved 8% vol. Ved højere og lavere fugtindhold bliver temperaturgradientfaktoren væsentlig mindre. Forsøgene, hvortil nr. 163 hører, er ikke kommet tilstrækkeligt i ligevægt, hvad der også kan ses på fig. 6.27. Men hvorfor er så de øvrige resultater acceptable, og hvornår kan forsøget standses? Dette kan ikke besvares helt klart, men noget tyder på, at hvis lagene op mod den kolde side ikke optager mere fugt eller meget lidt, vil en beregning af temperaturgradientfaktoren give rimelige resultater. Derfor kan forsøget standses, når der er ligevægt i fugtindholdet på den kolde side.

På fig. 6.32 ses en "middelkurve" for egne resultater og andres forsøgsresultater, som de fremgår af litteraturen. HANSON [16] har udført forsøg med gasbeton, men ikke beregnet temperaturgradientfaktoren. Dette kan dog forholdsvis enkelt gøres, idet der er angivet både temperatur- og fugtfordelinger i slutttilstanden. Det har dog vist sig nødvendigt at benytte en lidt anden fugtfordeling end den, der er optegnet på fig. 6.4, idet en beregning i området 6-8 cm giver urimelige resultater på grund af de store gradienter i fugtindholdet. Ved brug af regression ud fra de af HANSON målte fugtindhold er der beregnet en bedre fugtfordelingskurve, som benyttes ved beregningen af temperaturgradientfaktoren. Resultatet fremgår af fig. 6.32. Kurven viser samme form som vore resultater. VOS [44] har udført et enkelt tagkondensationsforsøg (fig. 6.3),

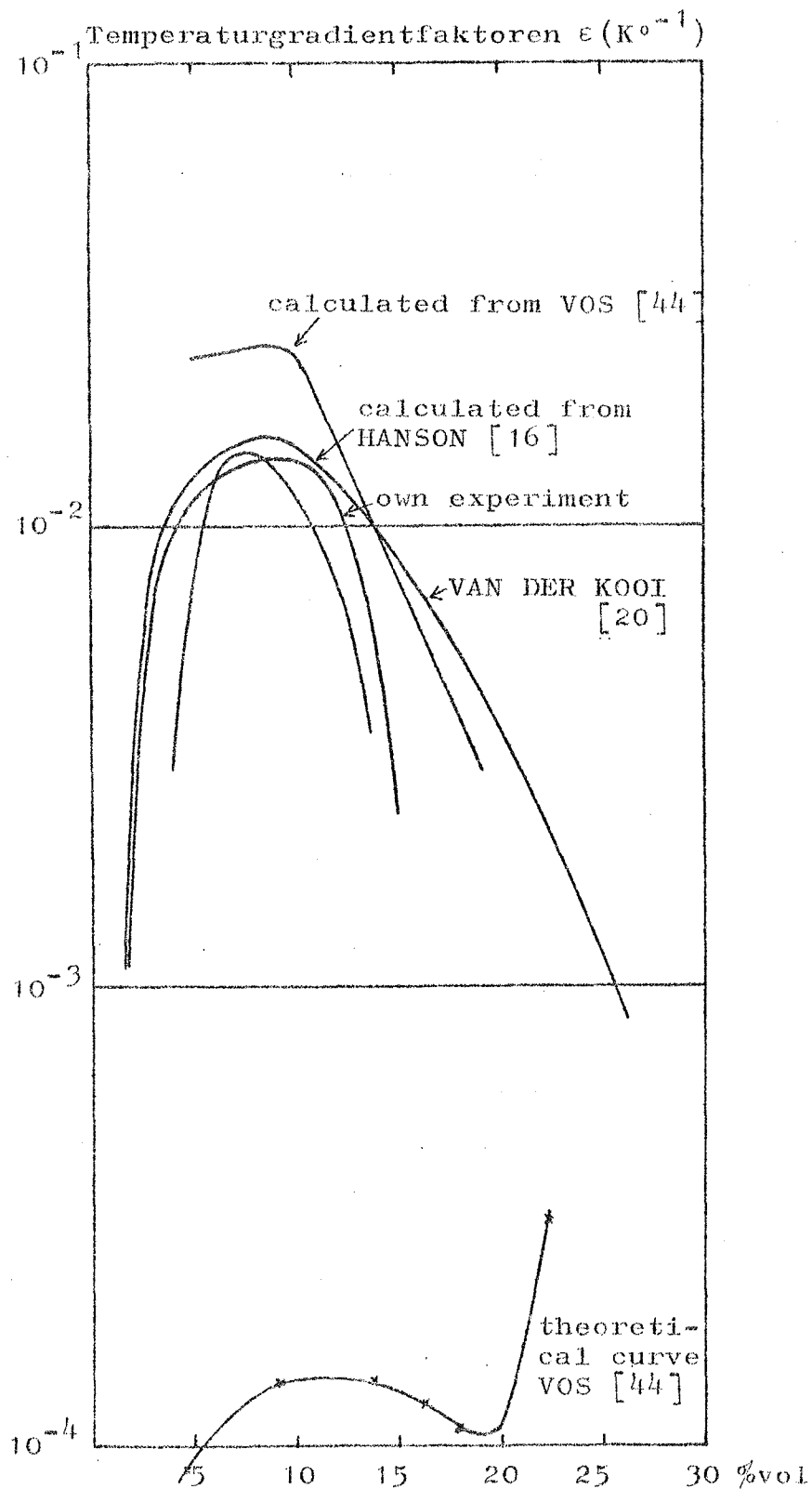


Fig. 6.32. Temperaturgradientfaktoren beregnet for ligevægt i tage af gasbeton fra litteraturen og egne eksperimenter, samt en teoretisk beregning.

Temperature gradient factor calculated from equilibrium in roofs of cellular concrete from literature and own experiments, and a theoretical calculated curve.

som kan anvendes til beregning af temperaturgradientfaktoren. Desuden har VOS udført en teoretisk beregning af faktoren, som også ses på fig. 6.32. Denne afviger med en faktor på ca. 100 fra de ved forsøg fundne værdier. Denne forskel må skyldes, at teoriens forklaring af fugttransporten ikke stemmer med virkeligheden, bl.a. er porestrukturen af væsentlig betydning.

VAN DER KOOI [20] har beregnet temperaturgradientfaktoren (fig. 6.6) ud fra forsøg med diffusionstætte prøvelegemer indeholdende en bestemt vandmængde. Disse prøvelegemer gives forskellig temperatur på endefladerne, hvorved fugtfordelingen i prøvelegemet vil ændre sig. Ud fra kendskabet til temperaturfordelingen og fugtfordelingen kan temperaturgradientfaktoren beregnes. Den herved fundne kurve (fig. 6.6) stemmer udmærket overens med de kurver, der er beregnet ud fra tagkondensationsforsøg. VAN DER KOOI's beregninger viser to serier af resultater, en hvor fugtfordelingen er fundet efter 1 måned, og en anden, hvor fugtfordelingen er fundet efter 2 måneder. Resultaterne efter 2 måneder giver gennemgående lavere værdier, da man nu er nærmere ved en ligevægtstilstand. Vore resultater ligger generelt lavere end VAN DER KOOI's, og det stemmer godt med, at hans forsøg er stoppet, inden ligevægt er indtrådt.

VAN DER KOOI har desuden forsøgt målinger af fugt- og temperaturfordelinger ved høje fugtindhold (over 30% vol). De målte fugtfordelinger ses på fig. 6.33. Disse ser højst forvirrende ud, hvilket formodentlig skyldes dels problemer med måling af fugtindholdet (veje-tørre metoden), og dels at der ikke er ventet længe nok til at få ligevægt. Sandsynligvis skal der ventes i flere år for at få ligevægt, fordi den i poresystemet indesluttete luft skal flyttes rundt i materialet. Dette er en meget langsom proces, idet luften skal opløses i vandet for at kunne skifte plads i prøvelegemet. Der kan heller ikke ses bort fra, at hysteresis kan have haft indflydelse på det meget forvirrende resultat.

Stationary moisture distributions in samples exposed to a temperature difference (high moisture contents).

- moisture distributions determined after 2 months
- moisture distributions determined after 4 months

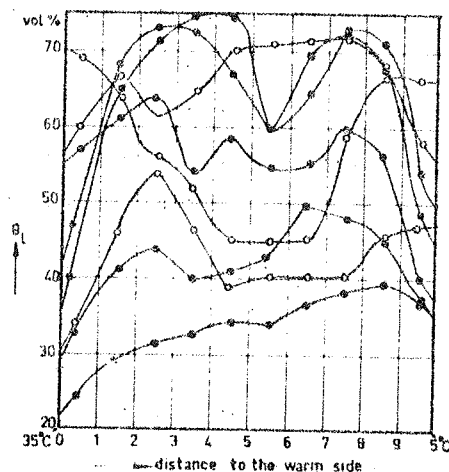


Fig. 6.33. Fugtfordelinger i prøvelegemer udsat for temperaturdifferens.

Moisture distributions in specimens exposed to a temperature difference.

## 7. BEREGNING AF IKKE-STATIONÆR FUGTTRANSPORT

7.0. Indledning

Det har altid været et ønske at kunne beregne den ikke-stationære fugttransport i materialer. Arbejdet har dog været en del hæmmet af, at de grundlæggende differential-ligninger er ret komplicerede, men med visse simplifikationer har VOS [44] givet en teori for fugtophobningen i tage. Denne ophobning er desuden blevet beregnet af HANSON [15], der benyttede en tidlig elektronregnemaskine med begrænset kapacitet.

De grundlæggende ligninger, som kan anvendes, er f.eks. 2-leds ligninger:

$$1. \quad g = - D \cdot \rho \frac{\partial \psi}{\partial x} - K \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$2. \quad g = - \delta \frac{\partial c}{\partial x} - D \cdot \rho \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$3. \quad g = - \delta \frac{\partial c}{\partial x} - K \frac{\partial T}{\partial x}$$

Desuden kan varianter heraf anvendes, idet vanddampkoncentration kan ombyttes med vanddamptryk eller suction, og fugtindholdet kan angives i  $\text{kg/m}^3$  eller  $\text{kg/kg}$  i stedet for  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .

Disse ligninger er principielt lige gode, men det er blevet valgt at anvende ligning nr. 1., som bl.a. findes hos VAN DER KOOI [20], der også har målt de tilhørende fugttransportkoefficienter. Ligningen er i hvert fald udmærket for fugtindhold over det hygroskopiske, idet temperatur- og fugtindhold i  $\text{m}^3/\text{m}^3$  er de målte størrelser. I det hygroskopiske område ville ligning nr. 2. nok være bedre, idet den indeholder vanddampkoncentrationen som parameter og diffusionstallet som koefficient. Begge disse størrelser er det almindeligt at måle i det hygroskopiske område.

Da disse ligningssystemer først og fremmest er matematiske udtryk for fugttransporten, er der principielt intet i vejen for at beregne koefficienter for en ligning ud fra de kendte værdier i en anden. Sådanne omregninger findes omtalt i NICOLAJSSEN [28].

Da koefficienterne til samme gradient (f.eks. temperatur) ikke er den samme for to forskellige ligninger (f.eks. nr. 1. og 3.), ligger der et problem i at anvende målte fugttransportkoefficienter på den rette måde. Det kræver kendskab til forsøgsbetingelser og forsøgsopstilling at afgøre, hvilken koefficient der er målt. En form for kontrol kan gennemføres ved at foretage en teoretisk beregning med den målte koefficient og de virkelige forsøgsbetingelser. Giver denne beregning fugtfordelinger af samme art som de målte, er den målte koefficient i orden. Er der væsentlige afvigelser, er det rimeligt at undersøge, om andre faktorer har influeret på forsøgene. Desuden må man være klar over, at alle bygningsmaterialer i praksis er inhomogene.

### 7.1. Udledning af differentialligning for fugttransporten

Vi ser på en konstruktion med et enkelt homogent materiale med tykkelsen  $d$ . Vi forudsætter desuden, at transporten er en-dimensional.

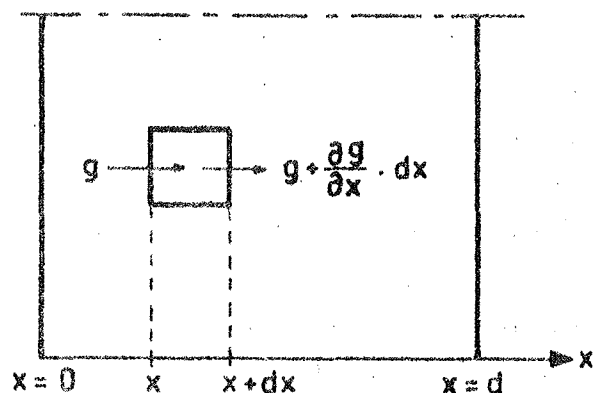


Fig. 7.1. En-dimensional fugttransport i et homogent materiale.

One-dimensional moisture transfer in a homogeneous material.

For elementet  $dx \cdot dy \cdot dz$  fås kontinuitetsligningen for den transporterede fugtmængde i tiden  $dt$ :

$$(g - (g + \frac{\partial g}{\partial x} dx)) dt dy dz = \frac{\partial \psi}{\partial t} \rho dt dx dy dz$$

Heraf fås:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial g}{\partial x}$$

hvor  $g$  er fugttransporten  $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$

$\psi$  er fugtindholdet  $[\text{m}^3/\text{m}^3]$

$\rho$  er vandets rumvægt  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Fugttransporten antages at bestå af to dele med henholdsvis temperatur- og fugtindhold som potentialer, d.v.s.:

$$g = - D \cdot \rho \frac{\partial \psi}{\partial x} - K \frac{\partial T}{\partial x}$$

hvor  $D$  er kapillarledningstallet  $[\text{m}^2/\text{s}]$

$K$  er termodiffusionstallet  $[\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}]$

$T$  er temperaturen  $[\text{K}]$

Dette udtryk differentieres med hensyn til  $x$ :

$$\frac{\partial g}{\partial x} = - \rho \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial \psi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x})$$

Indsættes dette i kontinuitetsligningen, fås:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial \psi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (\frac{K}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x})$$

Denne 2. ordens differentiaalligning kan løses ved brug af differensmetoden, som er velegnet til brug ved EDB-beregning. Idet  $D$  og  $K$  antages at være konstante, når der regnes med små differenser af  $t$ ,  $x$ ,  $\psi$  og  $T$ , kan udledes:

$$\frac{\Delta \psi}{\Delta t} = D \frac{\Delta^2 \psi}{\Delta x^2} + \frac{K}{\rho} \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}$$

På fuldstændig tilsvarende måde kunne de øvrige fugttransportligninger omskrives til 2. ordens differensligninger (SANDBERG [35]).



## 7.2. Anvendelsen af EDB

Den i afsnit 7.1 udledte differensligning må løses ved brug af et regnemaskineanlæg med korte regnetider, idet det for at give stabile beregninger er nødvendigt med mange regneoperationer. Det er desuden yderligere en komplikation, at koefficienterne er afhængige af fugtindholdet, hvilket kræver endnu flere regneoperationer pr. beregning. Af disse grunde er det først i de seneste år, det har været muligt at udføre disse beregninger af differensligningen med variable koefficienter.

Det EDB-program, som er opbygget til denne afhandling, følger den beskrivelse, som findes i VAN DER KOOI [20], side 68-80. Der er dog foretaget nogle ændringer, bl.a. er programmet ændret fra ALGOL til FORTRAN. I appendix 2 findes programteksten samt oplysninger om input-format samt output.

Afsnit 7.3 indeholder de data, som skal indgå i EDB-programmet, mens afsnit 7.4 indeholder nogle beregnede fugtfordelinger.

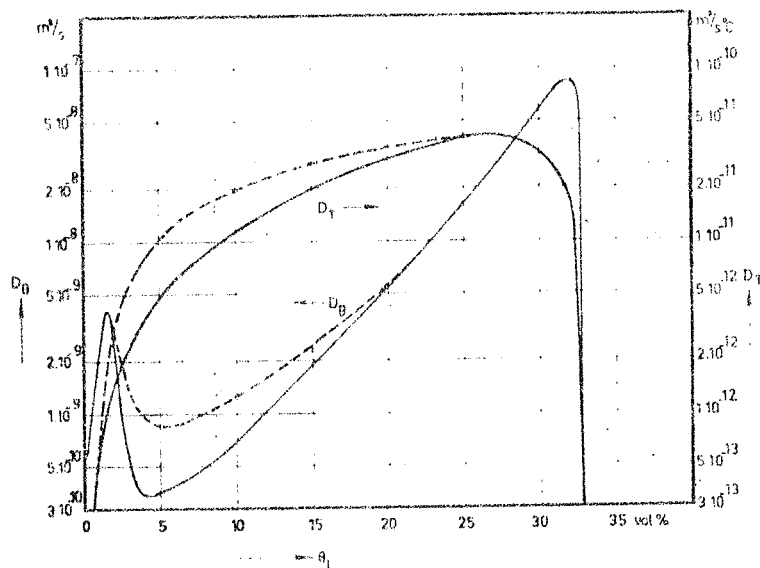
## 7.3. Programdata til beregningerne

Fugttransportkoefficienten  $D_0 = D$  og  $D_T = K/\rho$  indgår som afhængige af fugtindholdet. Der anvendes værdierne fra forsøg af VAN DER KOOI (fig. 7.2), men andre kan anvendes.

Som sorptionskurve anvendes data fra VAN DER KOOI eller VOS (fig. 7.3).

Varmeledningstallets afhængighed af fugtindholdet (fig. 7.4) kendes fra målinger af VAN DER KOOI og KRISCHER.

Begyndelsesfugtindholdet kan vælges vilkårligt, f.eks. byggefugtigt (20% vol) eller tørt (2% vol).



The diffusion coefficients  $D_\theta$  and  $D_T$  as a function of the moisture content,  $\theta_l$ .

— values, applied in computer program  
 - - - values, experimentally determined

Fig. 7.2. Fugttransportkoefficienterne  $D_\theta$  og  $D_T$  for gasbeton.

The diffusion coefficients  $D_\theta$  and  $D_T$  for cellular concrete.

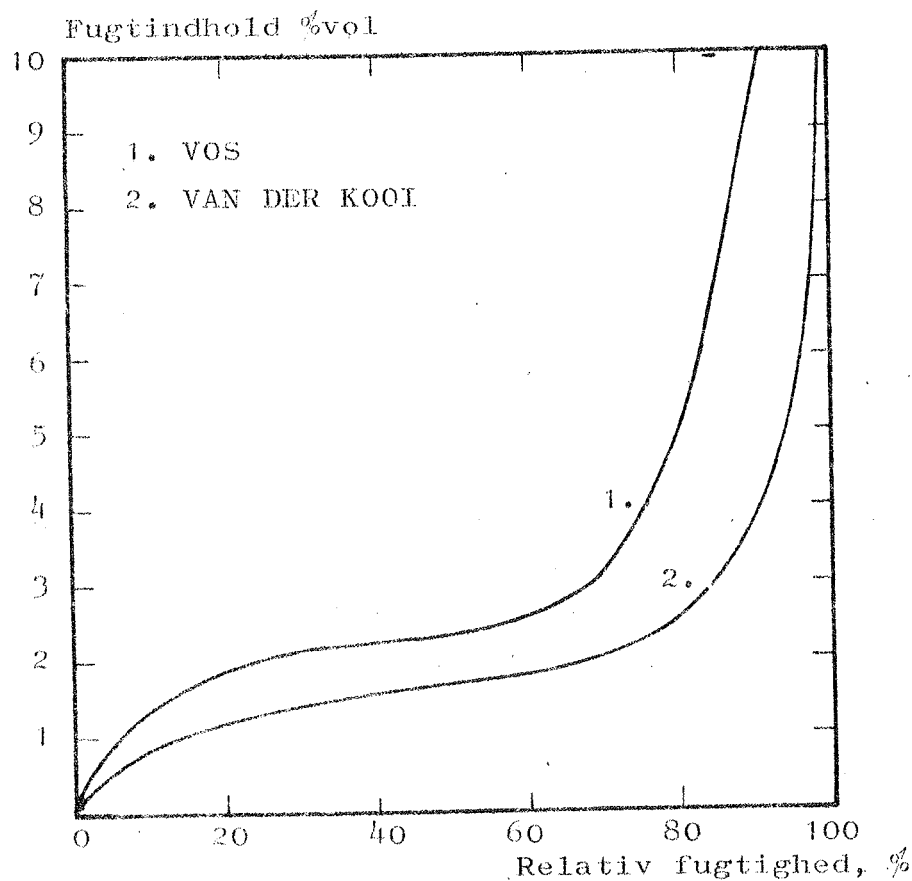


Fig. 7.3. Sorptionskurver for gasbeton

Sorption curves for cellular concrete.

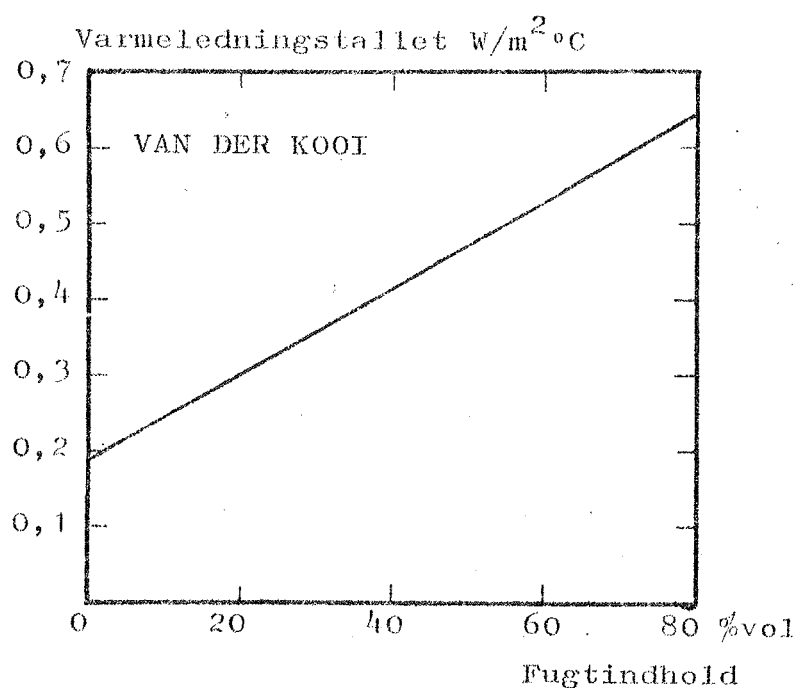


Fig. 7.4. Varmeledningstallet for gasbeton.

Coefficient of thermal conductivity  
for cellular concrete.

Udvendig temperatur og fugtighed fås fra målte månedsmiddeltemperaturer for København:

	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEC
T	-0,4	-0,2	1,6	5,8	11,0	15,3	17,1	16,0	12,0	8,1	4,0	1,2
φ	89	88	85	78	71	72	75	79	83	86	88	90

Beregningerne viser, at døgnsvingninger er uden betydning for resultaterne, idet fugttransporten sker meget langsomt. Hvis man ønsker at tage hensyn til solindfald, kan månedsmiddeltemperaturer hæves svarende til indstrålingens betydning (SANDBERG [37]).

Den indvendige temperatur kan sættes til en ønsket månedsmiddelværdi. Vi har valgt 21°C konstant året rundt. Den indvendige relative fugtighed kan angives som:

$$c_i = c_u + 0,02 \text{ g/m}^3 \quad (\text{SANDBERG [37]})$$

Den anden mulighed er konstant indvendig fugtighed.

Temperatur- og fugtovergangstallene kan sættes til ønskede værdier.

Antallet af inddelinger i taget og tidsintervallernes længde må vælges ud fra, at beregningerne skal være stabile. Med 20 cm gasbeton tag og 10 lag skal tidsintervallet være 1 time. Iøvrigt kan man kontrollere, at beregningen er stabil ved at regne en gang til med et kortere tidsinterval. Hvis fugtfordelingerne ændrer sig, er beregningen ikke stabil, og tidsintervallet må gøres mindre endnu.

#### 7.4. Beregningseksempler

I det følgende er der gennemregnet en række eksempler med henblik på at undersøge indflydelsen af variationer i de enkelte faktorer.

Data for beregningerne:

Fugttransportkoefficienten	$D_g$	(fig.7.2)
-----	$D_T$	(fig.7.2)
Sorptionskurven	1) VAN DER KOOI	(fig.7.3)
	2) VOS	(fig.7.3)
Varmeledningstallet	1) variabelt	(fig.7.4)
	2) konstant	$\lambda = 0,207 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Tykkelse af tag	20 cm	
Starttidspunkt	1. januar	
Fugtovergangsmodstanden	$\beta = 1,08 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{h/kg}$	
(ligningen $g = \beta \cdot \rho(p - p')$ )		
Tidsinterval mellem beregn.	1 time	
Udvendig temperatur	månedsmiddel	(afsnit 7.3)
Indvendig temperatur	21°C	
Udvendig relativ fugtighed	månedsmiddel	(afsnit 7.3)
Indvendig relativ fugtighed	1) variabel	(afsnit 7.3)
	2) 40%	
	3) 55%	
Startfugtindhold	1) 3% vol.	
	2) 20% vol.	

De følgende figurer 7.5 - 7.15 er alle optegnet ved brug af en plotter styret af et EDB-program.

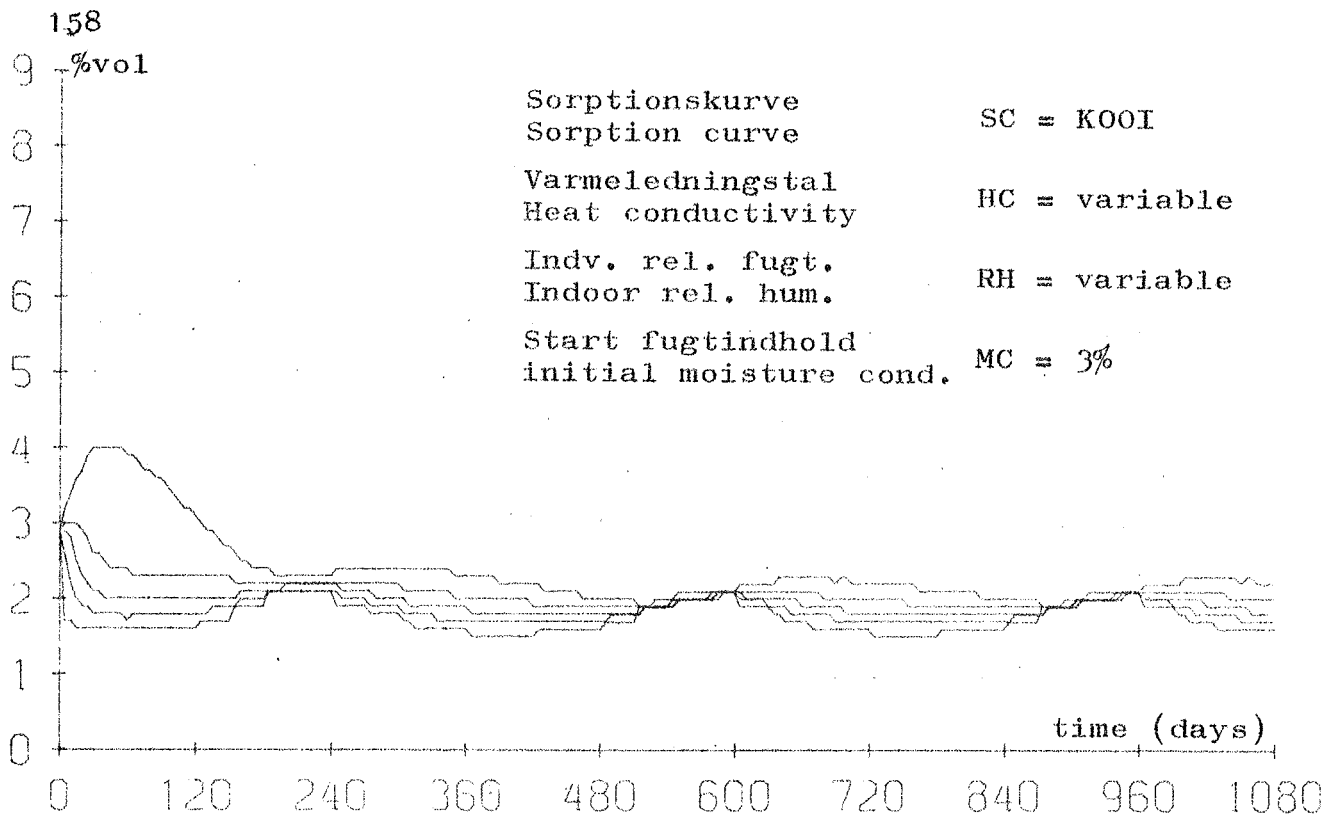


Fig. 7.5. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of cellular concrete.

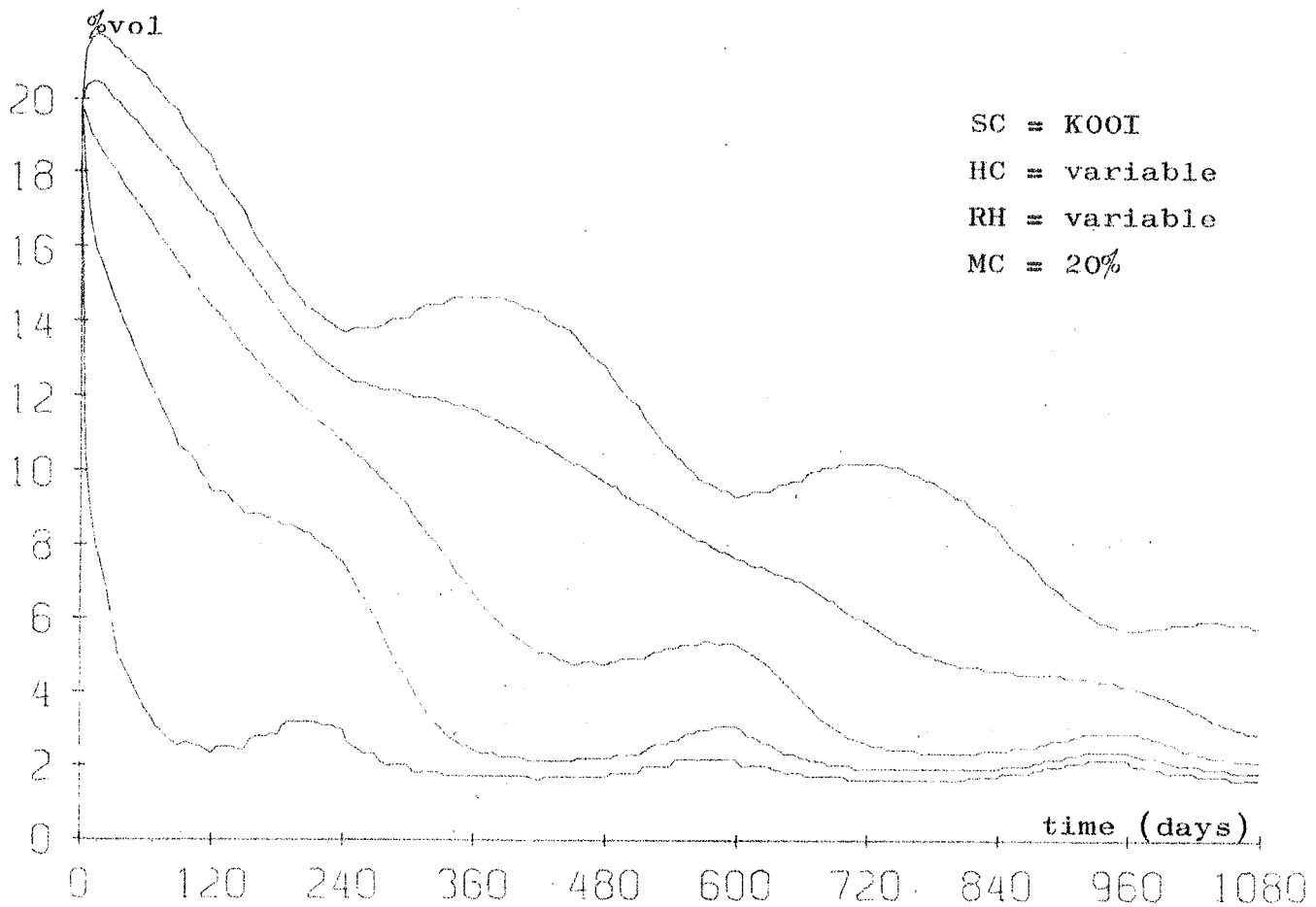


Fig. 7.6. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of cellular concrete.

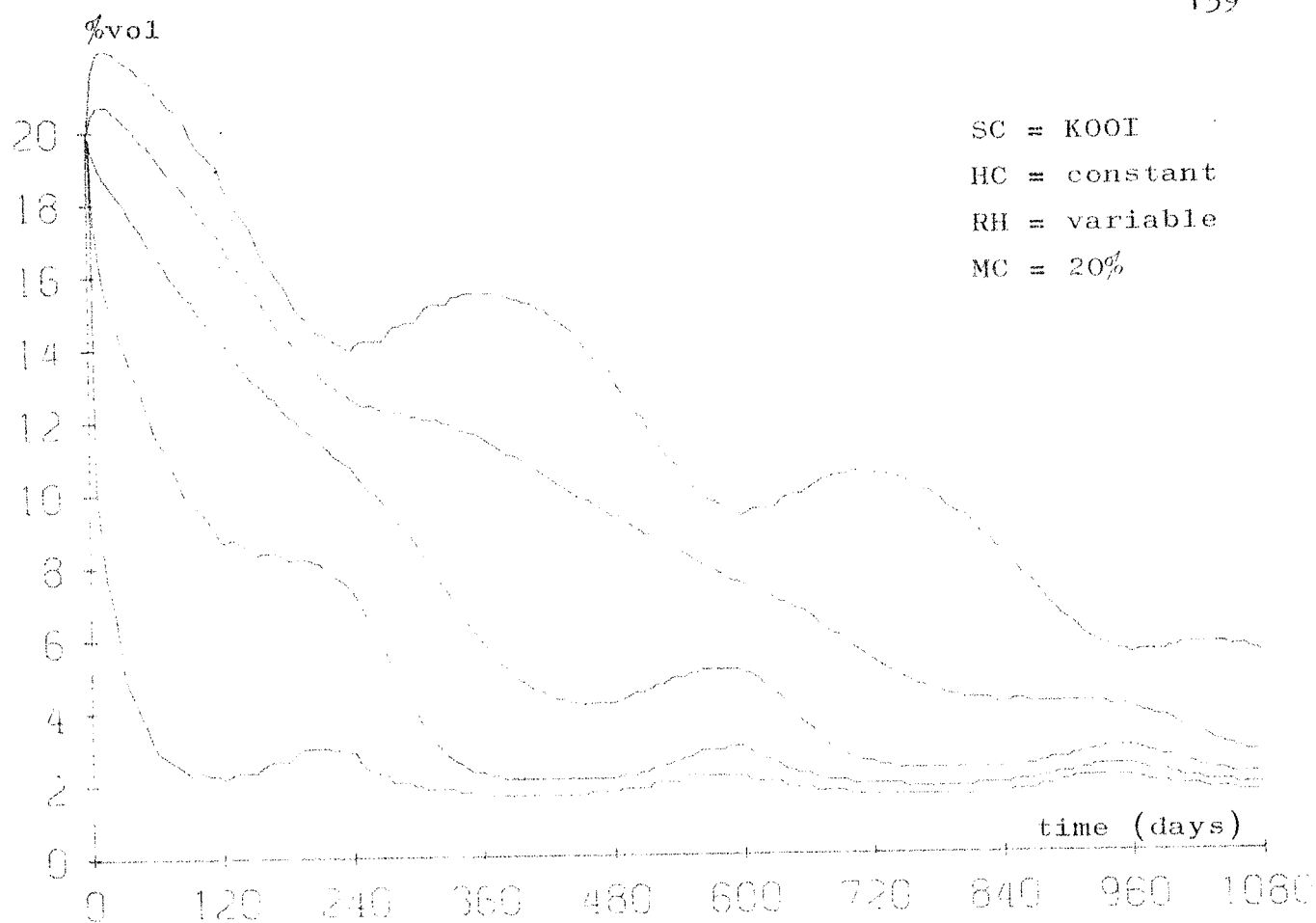


Fig. 7.7. Fugtindhold i tag af gasbeton.  
 Moisture content in a roof of  
 cellular concrete.

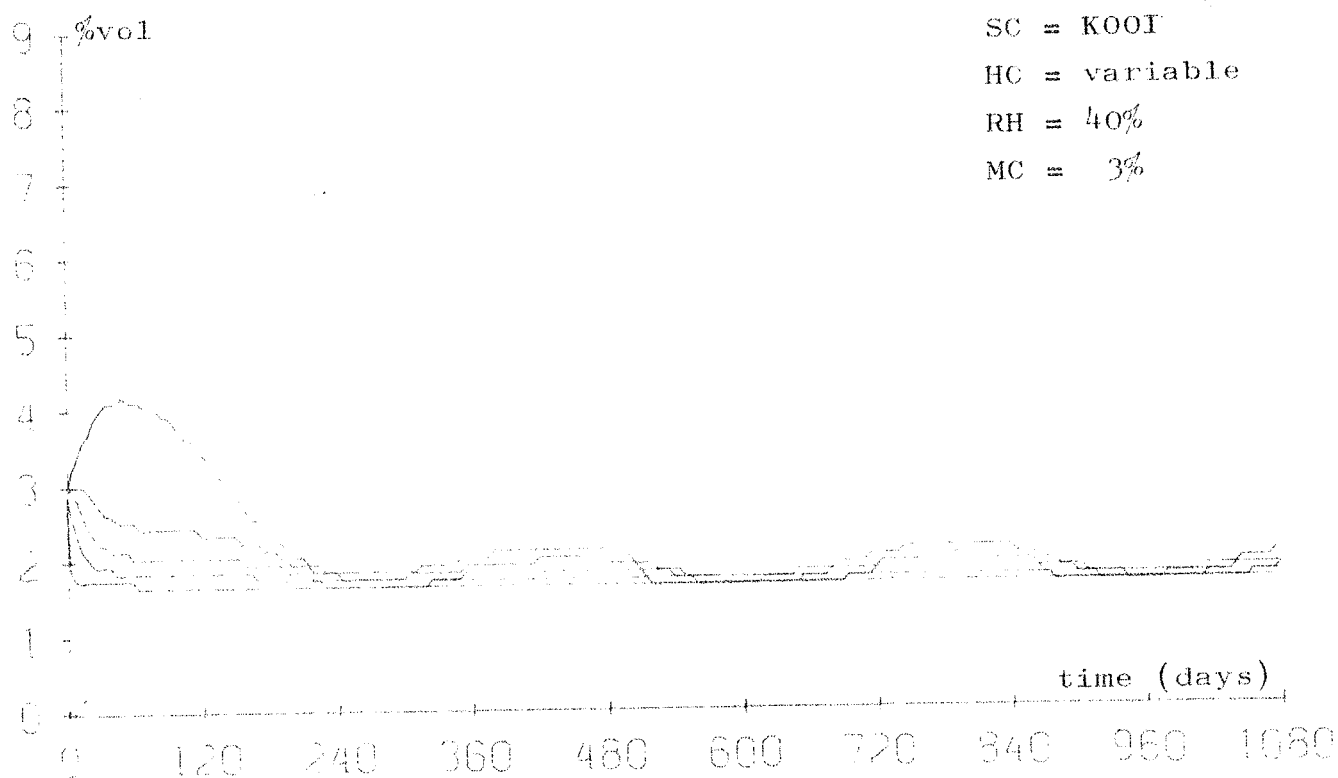


Fig. 7.8. Fugtindhold i tag af gasbeton.  
 Moisture content in a roof of  
 cellular concrete.

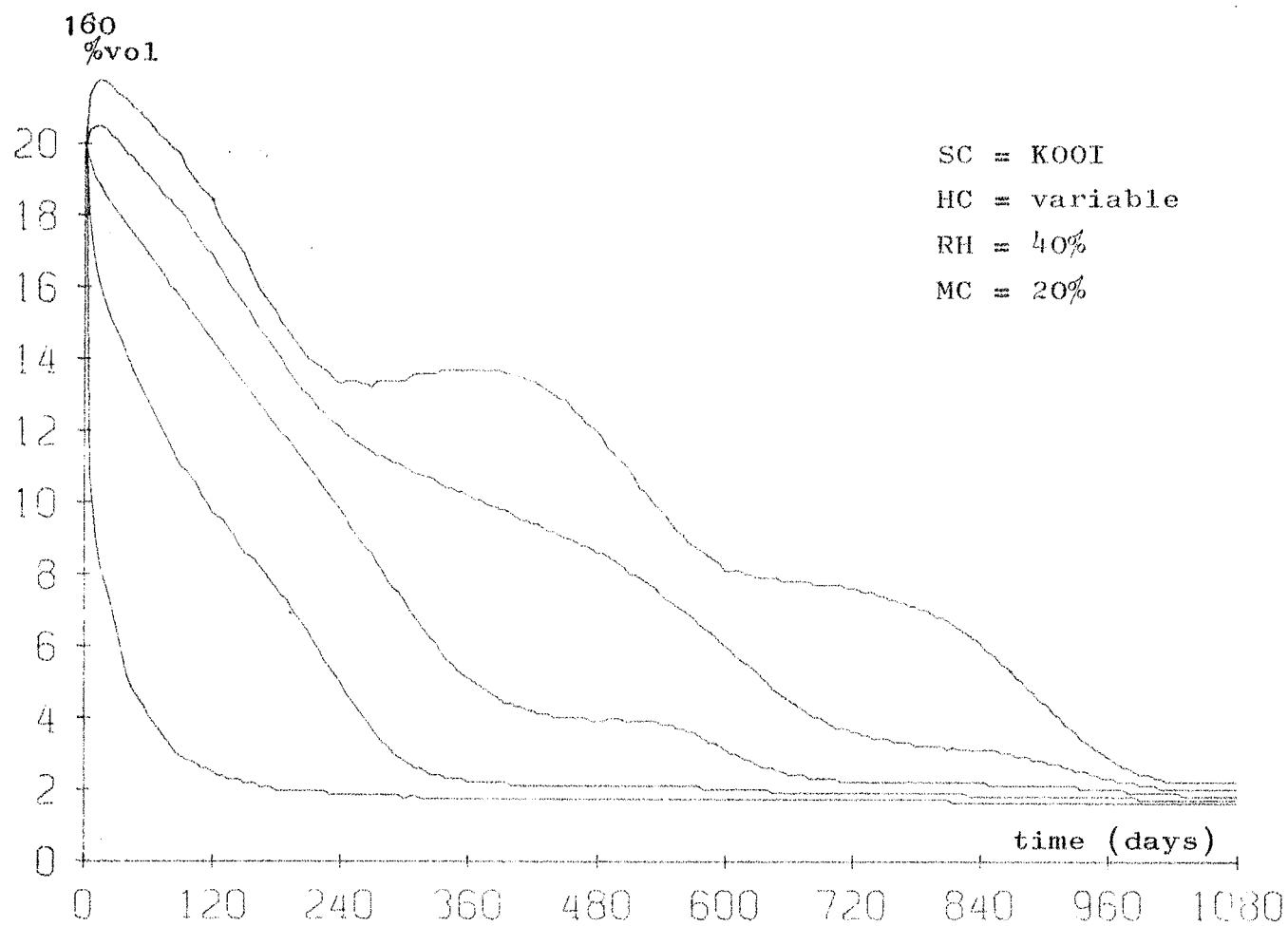


Fig. 7.9. Fugtindhöld i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

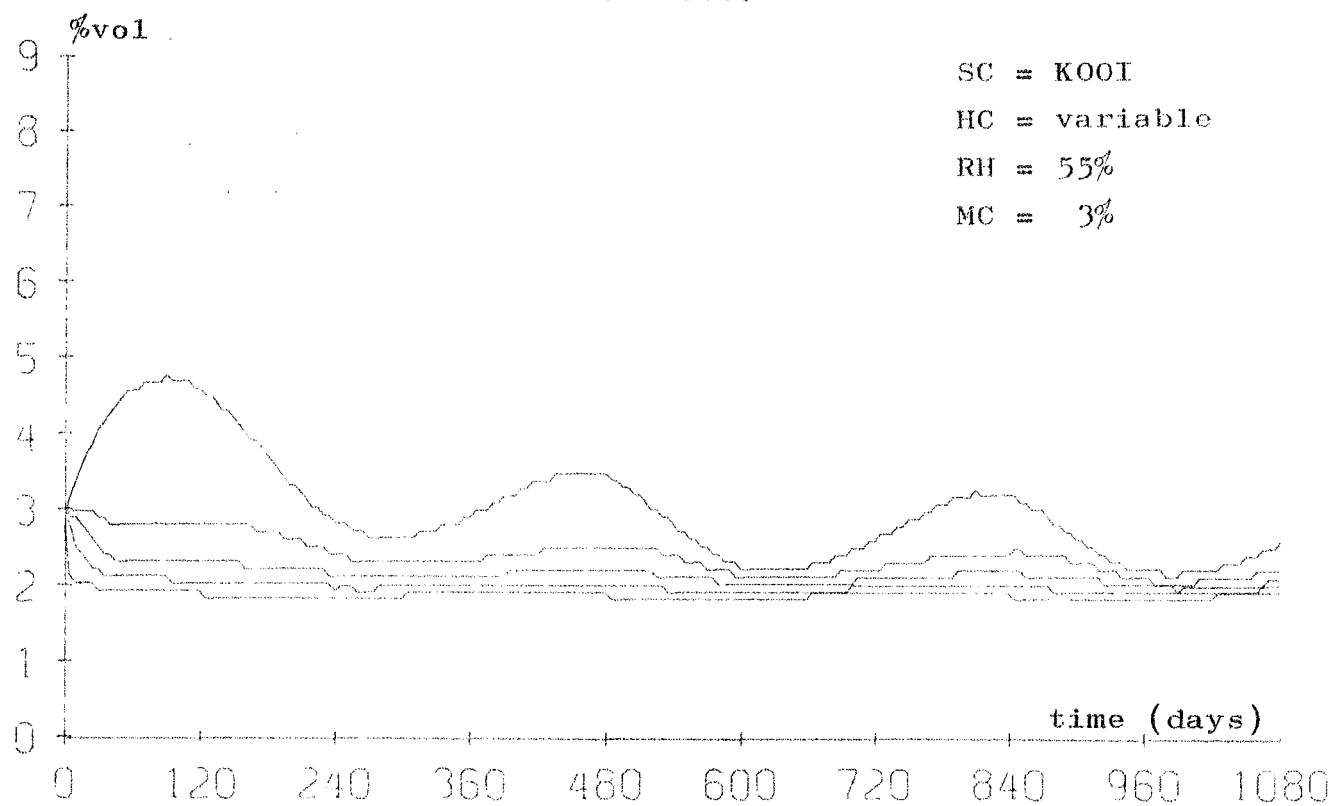


Fig. 7.10. Fugtindhöld i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

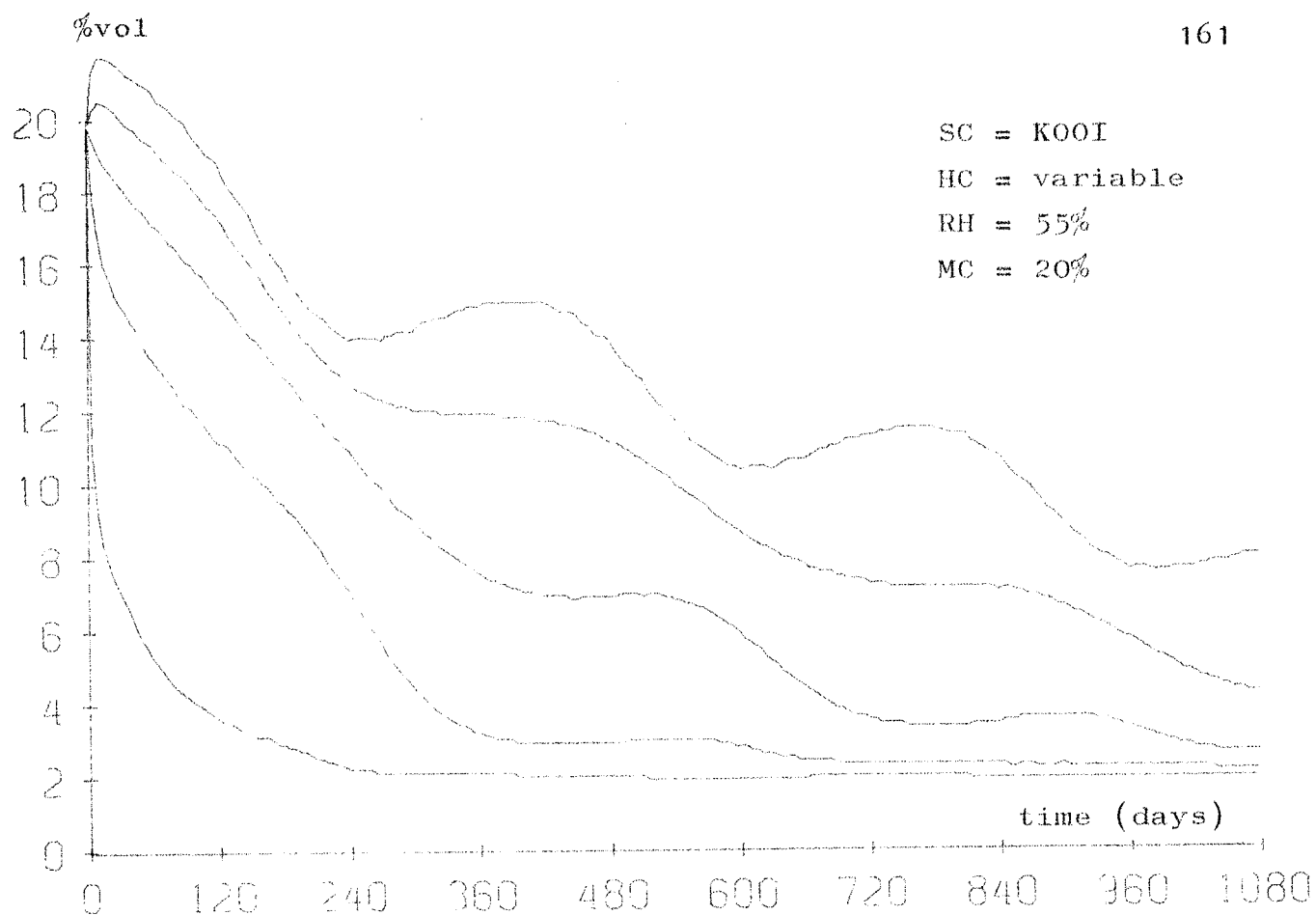


Fig. 7.11. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

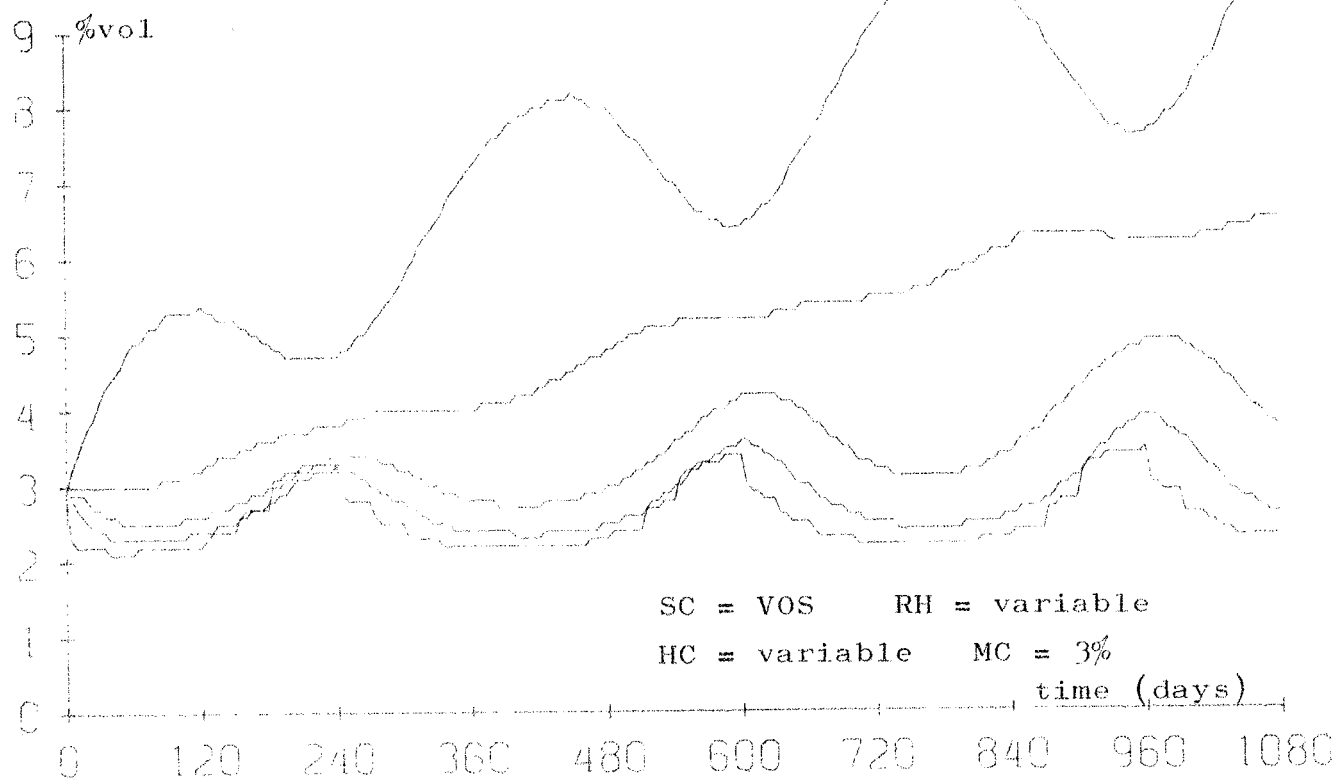


Fig. 7.12. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.



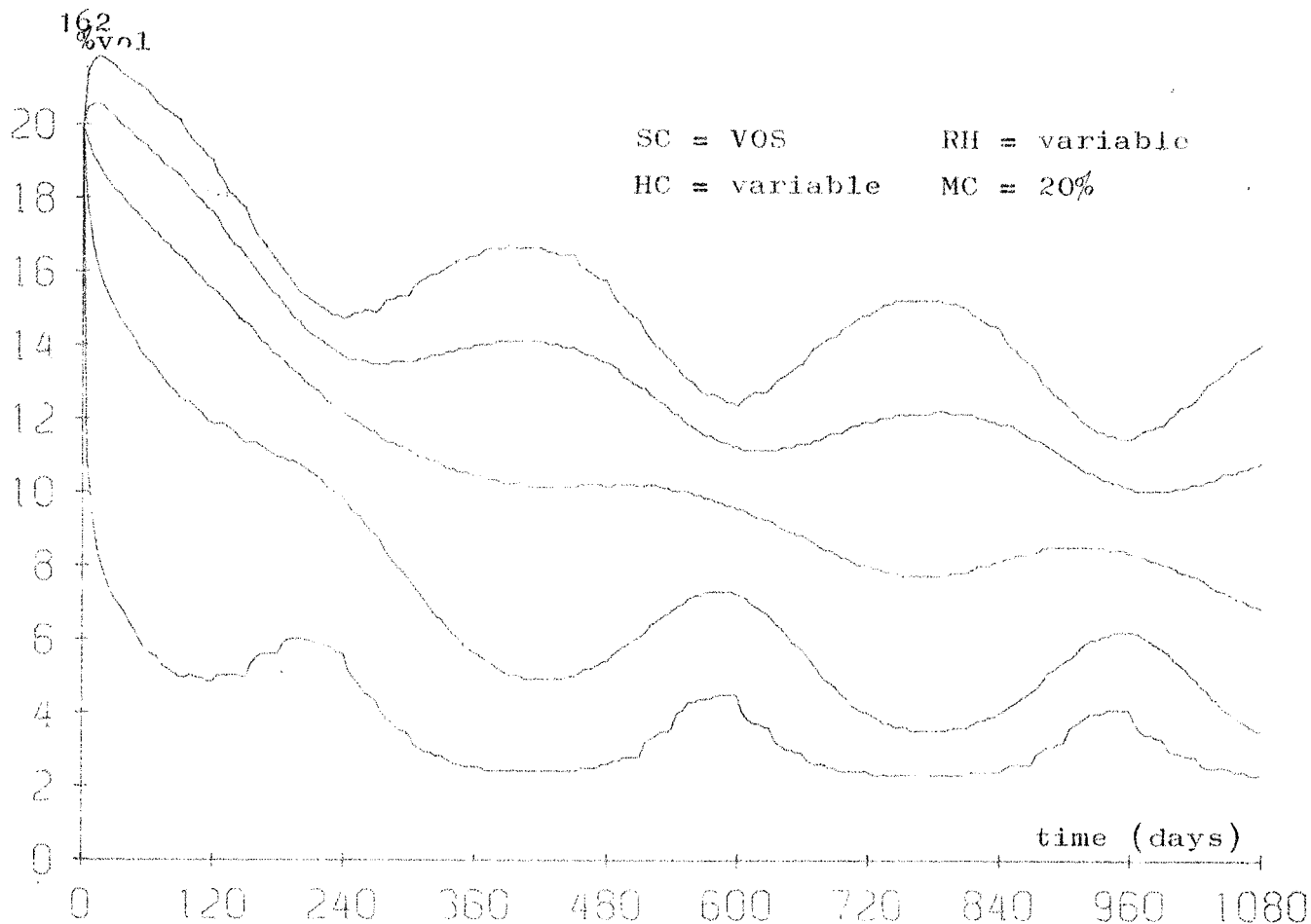


Fig. 7.13. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

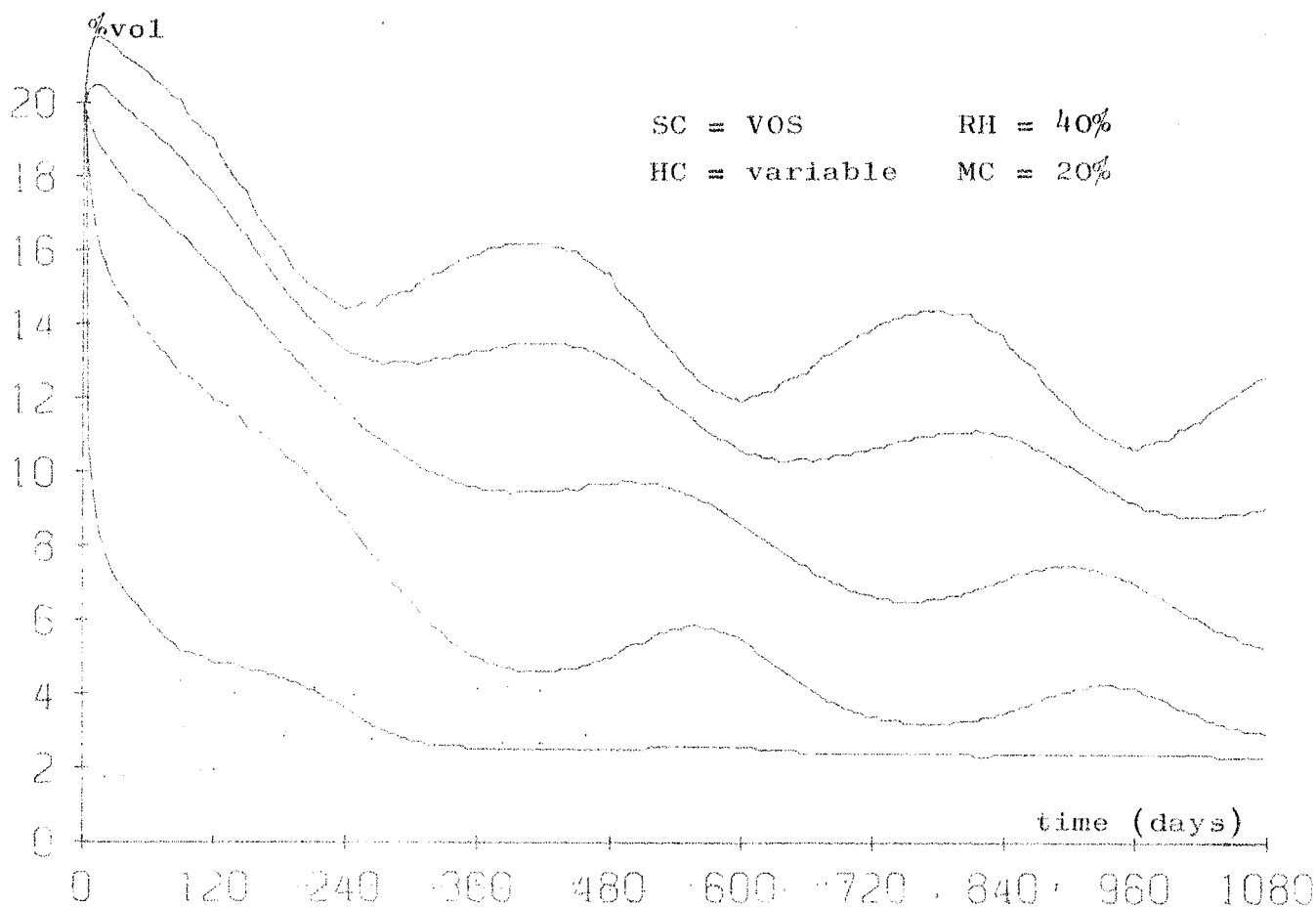


Fig. 7.14. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

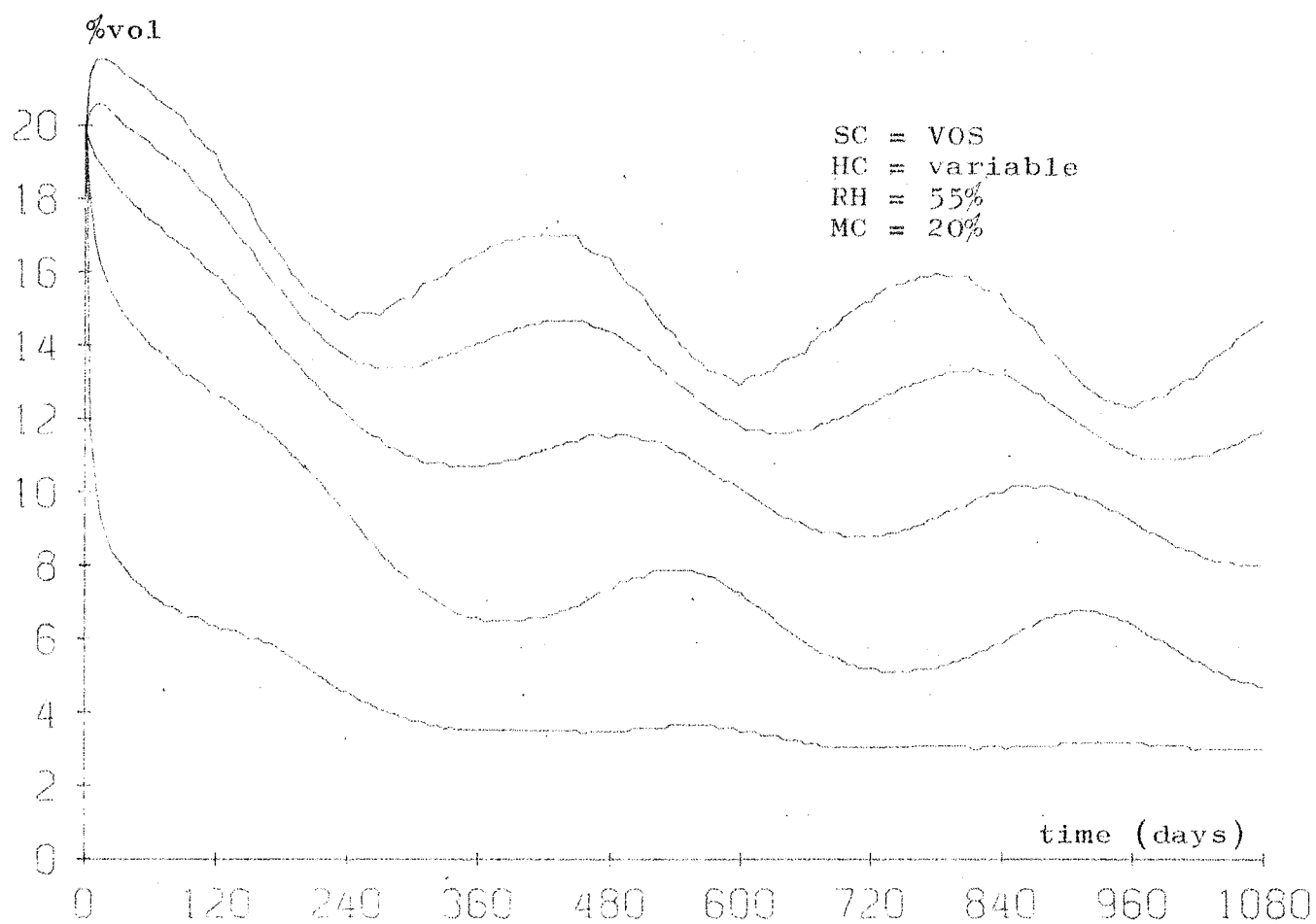


Fig. 7.15. Fugtindhold i tag af gasbeton.

Moisture content in a roof of  
cellular concrete.

## 7.5. Virkningen af faktorerne

### Begyndelsesfugtindholdet

Det lave fugtindhold (3%vol) svarer til tørt materiale og det høje (20%vol) til byggefugtigt materiale. Disse tilfælde er valgt for at vise normalt forekommende fugtindhold, samt at der opnås samme ligevægtstilstand før eller senere. Det kan vare år, inden den nås. Fig. 7.5 og 7.6 samt fig. 7.12 og 7.13 viser, at ved forskellige startfugtindhold bliver ligevægtstilstanden den samme.

### Varmeledningstallet

Sammenligning mellem beregninger med variabelt (fig. 7.6) og konstant (fig. 7.7) varmeledningstal viser, at resultatet bliver praktisk taget det samme. D.v.s. det er ikke nødvendigt at bestemme denne størrelse meget nøjagtigt.

### Indvendig relativ fugtighed

Forskellene mellem de enkelte tilfælde variabelt (fig. 7.13) og konstant 40% (fig. 7.14) og 55% (fig. 7.15) er relativt små. Den største indflydelse fås som ventet i laget nærmest ved den varme side.

### Sorptionskurven

Sammenligning mellem beregning med KOOI (fig. 7.11) og VOS (fig. 7.15) viser, at der her er en væsentlig forskel på resultaterne. Det er derfor nødvendigt at kende noget til denne parameter for at opnå rimelige resultater.

### Fugtovergangsmodstanden

Nogle beregninger, der ikke er gengivet her, viser, at fugtovergangsmodstanden har væsentlig betydning for udtøringsforløbets varighed. Det er derfor nødvendigt at kende denne størrelse for at få tidsforløbet til at stemme.

### Fugttransportkoefficienterne

Disses størrelse er af væsentlig betydning for resultaterne, bl.a. fordi de har store variationer med fugtindholdet.

#### 7.6. Sammenligninger med forsøg

For udtørningsforsøgenes vedkommende er der allerede omtalt en beregning med forskellige kapillarledningstal (fig. 5.38 og fig. 5.39). Denne beregning viser overensstemmelse med resultaterne for egne forsøg, når kapillarledningstallet er det af FOOI fundne. Overensstemmelsen kan gøres bedre, hvis man i højere grad anvender data for netop den gasbeton, som er anvendt ved forsøgene.

For tagkondensforsøgene er der kun udført enkelte beregninger, som imidlertid viser samme slags fugtfordelinger som ved forsøgene. Disse beregninger vil blive gengivet i en senere publikation.

## 8. KONKLUSION

Alle de udførte forsøg er sket på et enkelt materiale - gasbeton -, men de anvendte beregningsmetoder og forsøgsopstillinger kan uden videre vanskelighed overføres til helt andre materialer.

Den til disse forsøg udviklede målemetode for fugtfordelinger,  $\gamma$ -transmissionsmåling, har vist sig at opfylde den forventning, som blev stillet til metoden, og har samtidigt medført, at det er blevet muligt at få langt mere ud af forsøgene. Her kan der bl.a. henvises til den ikke-stationære beregning ud fra tagkondensationsforsøg af fugttransportkoefficienterne, som ikke kunne være gennemført uden denne nøjagtige ikke-destruktive metode. Det har været af væsentlig betydning for  $\gamma$ -transmissionsmålingen, at man ved brug af en programmerbar bordregnemaskine har kunnet udregne fugtindholdene straks. En senere beregning af resultaterne ville formodentlig have medført en vis skepsis over for nogle af de fremkomne resultater, f.eks. området med konstant fugtindhold ved udtørningsforsøg. Nu har det med det samme været muligt at gentage målingerne, hvis de forekom sære.

Det har været en overordentlig stor lettelse at anvende EDB til en lang række af de beregningsopgaver, som krævedes til disse forsøg. Dels har man herved fået mere ud af forsøgene, end det ved starten var antaget, og dels har man enkelt kunnet foretage korrektioner, som ellers ville have taget lang tid at udregne manuelt. Som det tydeligt fremgår af denne afhandling, har EDB også medført en lettere grafisk afbildning af mange af de størrelser, som ellers kun angives som middelværdier målt ud fra skriverstrimler. Det bør altid ligge klart, at udviklingen af EDB-programmer kun skal være et hjælpemiddel til en bedre bearbejdning af resultaterne. Af hensyn til andres interesse for nogle af programmerne er der i appendix 2 udskrifter af de vigtigste programmer.

Ved disse forsøg blev det på et tidligt tidspunkt besluttet, at alle måledata fra forsøgene skulle overføres til hulkort. Derfor findes der i dag ca. 150.000 hulkort, som indeholder de originale temperatur- og fugtmålinger under forsøgene. Det er denne form for datalagring, som har medført, at anvendelsen af EDB er blevet så gunstig, og maskinel optegning af figurer har været mulig. For at inspirere andre til at anvende lignende metoder er der i appendix 2 vist, hvordan den fysiske opbygning af disse hulkort ser ud.

Udtørningsforsøgene har vist, at den helt simple inddeling af udtørringen i 3 faser ikke er dækkende for de virkelige forhold, idet der ved forsøgene er fundet et område, hvor fugtgradienten er nær ved nul, medens udtørningshastigheden har samme størrelse som tidligere under forsøget, hvor der fandtes en større fugtgradient. Det kan ses på samtlige forsøgsresultater, at dette område med fugtgradient nær nul deler udtørringen op i 2 klart adskilte områder, dels den rene væsketransport fra vandmætning til konstant gradient og dels den blandede transport fra fugtgradient nær nul, til ligevægtsfugtindholdet er indtrådt. Ved beregningerne af kapillarledningstallet viste det sig, at var der for lang tid mellem de enkelte målinger, kunne man opnå meget forvirrende resultater. Kapillarledningstallet viste et klart minimum ved et fugtindhold på ca. 60 vol%, et forhold som er bemærkelsesværdigt. Det var ved beregningen af kapillarledningstallet nødvendigt at anvende en række tilnærmelser for fugtfordelingerne, og det er derfor væsentligt, at en teoretisk beregning af fugtfordelingerne ud fra det beregnede kapillarledningstal har givet samme slags fugtfordelinger, som der oprindeligt blev målt.

Tagkondensationsforsøgene blev udført, så de svarede til virkelige tage, men med konstante temperaturforhold. Disse forsøg har givet sammenhørende temperatur- og fugtfordelinger under kondensation, noget som så vidt vides ikke findes rapporteret ellers for den ikke-stationære periode. Det

har kunnet lade sig gøre at bestemme fugtfordelingerne med stor nøjagtighed ved brug af  $\gamma$ -transmissionsmålinger, idet disse ikke influeres af temperaturforholdene. Forsøgene viser, at der ved mere langvarige forsøg skabes en ligevægt mellem fugttransporten i form af kapillarsugning og temperaturafhængig transport. Ud fra ligevægstilstanden er temperaturgradientfaktoren blevet beregnet. Denne størrelse viser et maksimum ved omkring 8 vol%, som andres resultater også har vist. Det har ved brug af EDB været muligt ud fra det ikke-stationære forløb af kondensationen samt kendskab til kapillarledningstallet at beregne termodiffusionstallet og temperaturgradientfaktoren. Der er udviklet et EDB-program til beregning af kondensation i tage, men der er i denne afhandling ikke skabt sammenhæng mellem teori og forsøg.

Som et oplæg til at forklare, hvorfor kurverne for fugttransportfaktorerne ser ud, som det fremgår af resultaterne, er der givet en beskrivelse af materialets struktur. Dette er ikke en fuldstændig beskrivelse, men den indeholder en begyndelse. Porestruktur og sorptionskurve er målt, og desuden er der taget enkelte scanning-elektronmikroskop billeder. Det er ud fra porestrukturen tydeligt, at gasbetonen består af en stor mængde små porer i et område omkring  $r = 2 \cdot 10^{-8}$  m samt et stort antal omkring  $r = 5 \cdot 10^{-5}$  m. Disse to adskilte poresystemer kan sandsynligvis forklare, hvorfor gradienten er nær nul under udtøringsforsøg ved ca. 30%vol.

Ser man forsøgerresultaterne under ét, vil man bemærke, at der er foretaget mange tilnærmelser ved beregningen af fugttransportkoefficienterne, og der er en vis usikkerhed i bestemmelserne. Det er ikke i dette arbejde forsøgt at anvende statistik til at undersøge, hvor meget af usikkerheden der egentlig stammer fra de oprindelige værdier, og hvor meget fra tilnærmelserne. Dette problem vil det være rimeligt senere at tage op i samarbejde med statistikere.

Sammenfattende kan man sige, at uden  $\gamma$ -transmissionsmålinger og EDB ville denne undersøgelse ikke have kunnet give den samme grundige behandling af fugttransporten. Det er samtidigt væsentligt at understrege, at EDB og andre metoder kun er hjælpemidler til at skaffe bedre kendskab til fugttransporten med henblik på at skabe bedre bygningskonstruktioner.



## RESUMÉ

Dette arbejde omhandler bestemmelsen af fugtfordelinger i gasbeton under fugttransport, med en gennemgang af det fysiske grundlag, materialet, målemetode og en lang række forsøg samt beregningsmetoder.

Afsnit 2 indeholder det fysiske grundlag for binding af vand til materiale og for fugttransportformerne. Det er ved denne gennemgang omtalt, at en fysisk korrekt beskrivelse af, hvad der sker i et materiale, er nærmest umulig, idet der samtidigt dels kan være vand bundet på forskellig måde og dels optræde vand i forskellige faser. Der er til slut opstillet en række ligningssystemer, som kan anvendes til beskrivelse af fugt- og varmetransport, der altid forekommer samtidigt. Disse ligninger indeholder en række transportkoefficienter, som må bestemmes ved forsøg.

Afsnit 3 indeholder en gennemgang af gasbetons materialestruktur med særlig henblik på den type, der er anvendt ved forsøgene. Der er vist målinger af sorptionskurven og porestørrelsesfordelingen samt scanning-elektron-mikroskop billeder af et par udvalgte stykker gasbeton. I afsnittet findes også en beskrivelse af prøvelegemernes fremstilling og udformning som cylindre med diameter 133 mm og højde 55 mm.

Afsnit 4 indeholder en kort gennemgang af kendte målemetoder for fugt og derefter en grundig beskrivelse af den anvendte gammatransmissionsmålemetode. Den grundlæggende teori og statistik for måling med gammastråling er omtalt samt de herved fremkomne standardafvigelser på måleresultaterne, f.eks.  $\sigma = 0,5 \text{ \%vol}$  ved  $60\% \text{vol}$  fugt for dette udstyr med måletiden 1,38 min. Der findes en kollimering af gamma-strålen, så målingen foretages med et område på ca. 5 mm's højde og 10 mm's bredde.

Til bestemmelse af fugtindholdet er der foretaget en kalibrering af vands strålingsegenskaber. Målingerne af fugtindholdet foretages altid i de samme positioner, f.eks. i 9 højder med 5 mm's spring i prøvelegemet.

Afsnit 5 omhandler udtørningsforsøg og den tilhørende teori. Der er først en gennemgang af KRISCHER's simple teori og beregningen af kapillarledningstallet ud fra kendte fugtfordelinger. Der er derefter en gennemgang af teorier for kombineret varme- og fugttransport. Til udtørningsforsøgene er der fremstillet nogle klimaskabe (fig. 5.8), som kan bruges til at give konstante forhold under forsøgene. Temperaturmålingerne er sket med en 100-kanals datalogger ca. 1 gang pr. time, og samtlige data er overført til hulkort fra papirtape.

Nogle af prøverne er inden forsøget blevet vandmættet ved brug af vakuum til 75%vol fugtindhold. Alle forsøg er en-dimensionale. Da både temperatur- og fugtmålingerne er lagret på hulkort, er der ved gennemgangen af forsøgene anvendt plotter til automatisk optegning af kurver samt EDB-programmer for beregning af tilnærmelser til fugtfordelinger og kapillarledningstal.

Det er ved forsøgene fundet, at udtørringen kan deles i 3 områder: 1. område fra 75%vol til ca. 35%vol, hvor der er tale om ren væsketransport. 2. område fra 35%vol til 25%vol, hvor fugtgradienten er praktisk taget nul, selv om udtørningshastigheden ikke ændrer sig fra 1. område. 3. område fra 25%vol til ligevægt, hvor kapillarsugningen efterhånden erstattes af den langsomme diffusion. Ud fra de bestemte fugtfordelinger er kapillarledningstallets variation med fugtindholdet beregnet. Det viese, at tidsafstanden mellem de målte fugtfordelinger er af væsentlig betydning for resultatet, samt at kapillarledningstallet ikke er ens gennem hele prøvelegemet. Der er omtalt en række forsøg, som generelt må siges at give et kapillarledningstal, som svarer til målinger af VAN DER KOOI, som det

ses på fig. 5.36. Det kan bemærkes, at kapillarledningstallet har en maksimumværdi omkring de ca. 30%vol og et minimum ved ca. 60%vol. Til slut er omtalt en teoretisk beregning af fugtfordelingerne under udtørring.

Afsnit 6 indeholder beskrivelse af en række forsøg med kondensation i homogene, massive tage af gasbeton. Der er omtalt teori og forsøg vedrørende fugtophobning, især på grundlag af VOS og HANSON. Det er af stor betydning at betragte sluttilstanden, hvor fugttransporten er lig med nul, idet der herudfra kan skaffes oplysning om temperaturgradientfaktoren - forholdet mellem termodiffusionstallet og kapillarledningstallet. Variationen i temperaturgradientfaktoren viser et meget karakteristisk billede med et maksimum omkring 8%vol.

Der er til forsøgene fremstillet 2 klimaskabe, af samme princip som omtalt under udtørningsforsøgene men med prøvelegemerne anbragt i "taget" af kassen med en køleplade ovenpå. Med kølepladens temperatur samt temperatur og fugtighed i klimaskabet konstante er der udført en række forsøg.

Under forsøgene er temperaturfordelingen og fugtfordelingen i prøvelegemerne bestemt og værdierne lagt på hulkort. Under omtalen af de enkelte forsøg er disse værdier tegnet op; så de enkeltes variationer kan følges. Der er omtalt en række forsøg, hvor der mod slutningen er nået en ligevægtstilstand, og de beregnede temperaturgradientfaktorer er vist (fig. 6.31). Optegningen af fugtfordelingerne til forskellige tidspunkter viser klart, at fugtindholdet er højest ved den kolde side, og at der også først fås en ligevægt her. En sammenligning med andre beregnede temperaturgradientfaktorer viser god overensstemmelse.

Der er i afsnit 6.5 omtalt en beregning af temperaturgradientfaktoren og termodiffusionstallet ud fra et ikke-stationært forsøg, hvor fugt- og temperaturfordelingerne var

målt. Det er en forudsætning, at kapillarledningstallet er kendt. Resultatet af disse beregninger viser ganske god overensstemmelse med, hvad der er fundet på anden måde.

Afsnit 7 indeholder en omtale af den ikke-stationære fugttransports beregning. Denne foretages ved brug af EDB, idet de indgående koefficienter varierer meget. Det omtalte program kan bruges til beregning af fugt i tage. Der er udledt en differensligning for fugttransporten, som bruges til EDB-programmet. Der er i afsnit 7.3 en gennemgang af de data, som må kendes for at kunne bruge programmet. I næste afsnit findes optegnet en række beregningseksempler. Der er herudfra givet en vurdering af betydningen af de enkelte faktorer, som indgår i programmet.

Afsnit 8 indeholder en kortfattet konklusion af forsøgsresultaterne. Der er her især lagt vægt på betydningen af gammatransmissionsmålemetoden og anvendelsen af EDB til bearbejdning og optegning af resultater.

Appendix 1 indeholder en kort gennemgang af ét enkelt forsøg med opsugning af vand i gasbeton og den dertil hørende teori. Fig. A.3 viser fugtfordelingerne, som blev bestemt ved forsøget.

Appendix 2 indeholder en gennemgang af de vigtigste EDB-programmer, som er brugt til bearbejdning af resultaterne. Der er omtalt det nødvendige input, samt hvilke resultater der kan fås. Desuden er programteksterne (FORTRAN) gengivet. Til lagring af resultaterne er anvendt hulkort i bestemte formats, som også er omtalt.

## SUMMARY

This report deals with the determination of moisture distributions in cellular concrete during heat and moisture transfer. It contains a description of the physics, the material, the measuring method, experiments and calculation methods.

Chapter 2 contains the physics of binding of water to materials and the types of moisture transfer involved. Water is bound to a material in more than one way, and water is found in more phases simultaneously. A number of simultaneous heat- and moisture transfer equations are set up. These equations contain transfer coefficients which are to be experimentally determined.

Chapter 3 contains a description of the material structure of cellular concrete, specially for the type used. The sorption curve and the pore size distribution are reported, and there are scanning-electron-microscope photos of cellular concrete. In the chapter is also a description of the production of the cylindric test specimens, diameter 133 mm and height 55 mm.

Chapter 4 contains a short description of the known measuring methods for moisture, and thereafter a deeper description of the gamma-ray-transmission method which is used. The basic theory and the statistics for measurement with gamma-rays are reported. The standard deviation is found at 60%vol moisture content to be  $\pm 0.5\%$ vol for this equipment, and the measuring time 1.38 min. The equipment consists of a radiation source with 100 mCi  $\text{Am}^{241}$ , a scintillation detector and a BASC radioactivity measuring instrument. The collimation gives a beam of about 5 mm in height and 10 mm in width. There is made a calibration of the absorption of water in the material. The measurements of moisture content are always done in the same positions in the specimens, f.ex. in 9 heights with 5 mm intervals. The calculation of the moisture content from the measured

målt. Det er en forudsætning, at kapillarledningstallet er kendt. Resultatet af disse beregninger viser ganske god overensstemmelse med, hvad der er fundet på anden måde.

Afsnit 7 indeholder en omtale af den ikke-stationære fugttransports beregning. Denne foretages ved brug af EDB, idet de indgående koefficienter varierer meget. Det omtalte program kan bruges til beregning af fugt i tage. Der er udledt en differensligning for fugttransporten, som bruges til EDB-programmet. Der er i afsnit 7.3 en gennemgang af de data, som må kendes for at kunne bruge programmet. I næste afsnit findes optegnet en række beregningseksempler. Der er herudfra givet en vurdering af betydningen af de enkelte faktorer, som indgår i programmet.

Afsnit 8 indeholder en kortfattet konklusion af forsøgsresultaterne. Der er her især lagt vægt på betydningen af gammatransmissionsmålemetoden og anvendelsen af EDB til bearbejdning og optegning af resultater.

Appendix 1 indeholder en kort gennemgang af et enkelt forsøg med opsugning af vand i gasbeton og den dertil hørende teori. Fig. A.3 viser fugtfordelingerne, som blev bestemt ved forsøget.

Appendix 2 indeholder en gennemgang af de vigtigste EDB-programmer, som er brugt til bearbejdning af resultaterne. Der er omtalt det nødvendige input, samt hvilke resultater der kan fås. Desuden er programteksterne (FORTRAN) gengivet. Til lagring af resultaterne er anvendt hulkort i bestemte formats, som også er omtalt.

## SUMMARY

This report deals with the determination of moisture distributions in cellular concrete during heat and moisture transfer. It contains a description of the physics, the material, the measuring method, experiments and calculation methods.

Chapter 2 contains the physics of binding of water to materials and the types of moisture transfer involved. Water is bound to a material in more than one way, and water is found in more phases simultaneously. A number of simultaneous heat- and moisture transfer equations are set up. These equations contain transfer coefficients which are to be experimentally determined.

Chapter 3 contains a description of the material structure of cellular concrete, specially for the type used. The sorption curve and the pore size distribution are reported, and there are scanning-electron-microscope photos of cellular concrete. In the chapter is also a description of the production of the cylindric test specimens, diameter 133 mm and height 55 mm.

Chapter 4 contains a short description of the known measuring methods for moisture, and thereafter a deeper description of the gamma-ray-transmission method which is used. The basic theory and the statistics for measurement with gamma-rays are reported. The standard deviation is found at 60%vol moisture content to be  $\pm 0.5\%$ vol for this equipment, and the measuring time 1.38 min. The equipment consists of a radiation source with 100 mCi  $\text{Am}^{241}$ , a scintillation detector and a BASC radioactivity measuring instrument. The collimation gives a beam of about 5 mm in height and 10 mm in width. There is made a calibration of the absorption of water in the material. The measurements of moisture content are always done in the same positions in the specimens, f.ex. in 9 heights with 5 mm intervals. The calculation of the moisture content from the measured

intensity is made on a desk calculator with programming devices in about 1 min. per height. A description of the gamma-ray method in English is found in NIELSEN [30].

Chapter 5 contains the drying-out experiments and the theory of drying-out. First a description of KRISCHER's theory and the calculation of the water diffusivity from known moisture distributions. Examples of theories of combined heat- and moisture transfer are quoted but not used in this report, as all the transfer coefficients are not known. Climate boxes (fig. 5.8) have been made for the drying-out experiments. All temperature measurements during the experiments are made by copper-constantan thermocouples. The measurements are carried out about one scan each hour by a 100-channels datalogger. The results are punched on paper tape and then transferred to punched cards. During the experiments an hour counter was used to define the experimental time.

Some of the specimens have been waterfilled to 75%vol moisture content by water under vacuum. All experiments are one-dimensional. The results of the temperature and moisture measurements are stored in computer cards. These cards are used as input for computer programs and computer plotting of the results as seen in this report. Calculation of the moisture diffusivity is made by computer.

The experiments have shown that the drying-out can be divided into three regions. The first region 75% - 35%vol moisture content is purely liquid flow. The second region 35% - 25% vol shows that the moisture gradient is almost zero. But the drying-out rate is not changed from the first region. The third region 25%vol to equilibrium shows that the liquid flow is gradually reduced to a diffusion flow. From the measured moisture distributions the moisture diffusivity is calculated. It is seen that the time interval between the moisture distributions is of importance for the result.

It is found that the moisture diffusivity is not the same all the way through the specimen. The moisture diffusivity



is found to be in agreement with the values of VAN DER KOOI shown in fig. 5.36. It is seen that the moisture diffusivity has a maximum value at about 30%vol and a minimum at about 60%vol. This variation must be explained from the pore-size distribution. In the end of this chapter is shown a theoretic calculation of the moisture distributions during drying. A brief description in English of some of the results in this chapter can be found in NIELSEN [32].

Chapter 6 contains a description of experiments on condensation in homogeneous, solid, flat roofs of cellular concrete. The theory of condensation and experimental results is reported, primarily based in VOS and HANSON. In the final state the moisture transfer is equal to zero. From this equilibrium state it is possible to calculate the temperature gradient factor defined as the thermal moisture conductivity divided by the moisture diffusivity and the density of water. The temperature gradient factor is depended on the moisture content and has a maximum value at about 8%vol.

Two climate boxes of the same principle as used in the drying-out experiments have been made, but with the exception that the box top was constructed to contain the specimens and cold plates. The temperature of the cold plate, and the temperature and the relative humidity in the box were maintained constant during the experiments.

The temperature- and moisture distributions in the specimen were measured, and the results stored in computer cards. These data cards were used to make plots of the variations. There is also a description of experiments which were stopped near equilibrium. The temperature gradient factor was calculated (fig. 6.31) and shows good agreement with earlier experiments.

In section 6.5 is a calculation of the temperature gradient factor and the thermal moisture conductivity from a non-stationary experiment. The moisture- and temperature distributions were measured, and the water diffusivity was taken

from KOOI. The results of this calculation is in good agreement with results found in the normal way. A brief description in English of some of the results in this chapter can be found in NIELSEN [31].

Chapter 7 contains a description of non-stationary moisture transfer calculations. The transfer is calculated by a computer, as the transfer coefficients have a great variation. The difference equation for the transfer is developed. In section 7.3 the input data are given for the computer program of non-stationary roof condensation. In the next sections plots of calculation examples are shown, and an evaluation is given of the importance of the factors involved in the computer program.

Chapter 8 contains a brief description of the experimental research. The use of the gamma-ray method and of computers for the evaluation and plotting of results are of great importance for this report.

Appendix 1 contains a brief description of one experiment on absorption of water from a free water surface into a specimen of cellular concrete. In fig. A.3 the moisture distributions are drawn as they are measured during the experiment.

Appendix 2 contains a description of the most important computer programs which have been developed. There is a description of the necessary input and the output from the programs. The text of the programs is given (written in FORTRAN). The results have been stored on cards in special formats. The six programs are:

1. Calculation of corrected moisture distributions.
2. Calculation of polynomial regression on moisture distributions.
3. Plots of moisture distributions.
4. Plots of moisture or temperature distributions.
5. Calculation of water diffusivity.
6. Calculation of condensation in a roof.

## LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] ADAMSON, B., L. AHLGREN, S.G. BERGSTRÖM og L.E. NEVANDER:  
Fukt. Statens råd för Byggnadsforskning,  
programskrift 12. 1970.
- [2] AHLGREN, L.: Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial.  
Lund 1972.
- [3] AHLGREN, L.: Grundläggande lagar för fuktvandring i  
porösa byggnadsmaterial. Tekniska Högskolan i  
Lund, Institutionen för byggnadsteknik, intern  
rapport nr. 2, 1966.
- [4] AHLGREN, L.: Measurements of vapour transfer.  
Preliminary report, Av. för Byggnadsmateriallära,  
Lund 1972.
- [5] BANKVALL, C.G.: Porösitet och porstorleksfördelning.  
Lund 1969.
- [6] BOMBERG, M.: Water flow through porous materials.  
Part I-III, Report 19-21, Byggnadsteknik, LTH,  
Lund 1971, 1972.
- [7] CAMMERER, W.F.: Die kapillare Flüssigkeitsbewegung  
in porösen Körper. VDI-Forschungsheft 500, 1963.
- [8] CLAEßSON, J.: Beräkning av temperatur- och fukt-  
förlopp i porösa material. Arbetsrapport 1972:7,  
LTH 1972.
- [9] DAVIDSON, J.M., J.W. Biggar & D.R. Nielsen:  
Gamma-radiation for measuring bulk density and  
transient water flow in porous materials.  
J. Geophys. Res. 68:4777-4783, 1963.
- [10] ELSNAB OLESEN, S.: Evaporation og vandtransport i  
relation til jordens overfladestruktur og vand-  
indhold. Hydroteknisk Laboratorium, Landbohøj-  
skolen 1970.
- [11] GLASER, H.: Graphisches Vervahren zur Untersuchung von  
Diffusionsvorgängen. Kältetechnik nr. 10, 1959.

- [12] GREGG, S.J. & K.S.W. SING: Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press 1967.
- [13] GRODSTEIN, G.W.: X-ray attenuation from 10 keV to 100 MeV. Natl. Bur. Stad. U.S., Circ. 583, April 30, 1957.
- [14] GROENEVELT, P.H., J.G. DE SWART & J. CISLER: Water content measurement with 60 keV gamma ray attenuation. Symp. Soil Water, Grenoble 1969.
- [15] HANSON, R.: Fuktberäkningar av ytterväggar och yttertak. Byggmästaren, mars 1958.
- [16] HANSON, R.: Fuktegenskaper hos lättbetong och tegel. Byggmästaren, B. 3, 1958.
- [17] HARMATHY, T.Z.: Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. I & EC Fundamentals Vol. 8. No.1. Feb. 1969.
- [18] HARMATHY, T.Z.: Moisture and heat transport with particular reference to concrete. National Research Council of Canada, NRCC 12143 Ottawa, Oct. 1971.
- [19] HUBBELL, J.H.: Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV. Natl. Bur. Stad. U.S., NSRDS-NBS 29, 1969.
- [20] VAN DER KOOI, JAN: Moisture transport in cellular concrete roofs. 1971.
- [21] KRISCHER, O.: Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag 1963.
- [22] KRISCHER, O. & K. MAHLER: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären Vorgängen. VDI-Forschungsheft 473, 1959.
- [23] KÜNZEL, H.: Gasbeton. Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten. Bauverlag Berlin 1971.

- [24] LUND-HANSEN, P.: Fugttransport i byggematerialer. Danmarks tekniske Højskole, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 15, 1967.
- [25] LUND-HANSEN, P.: Udtørring af porøse materialer. Byggmästaren, maj 1967.
- [26] LYKOW, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Berlin 1958.
- [27] LYKOW, A.W.: Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies. London 1966.
- [28] NICOLAJSSEN, ASTA: Fugttransportkoefficienter for Gasbeton. Danmarks tekniske Højskole, Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 25, 1973.
- [29] NIELSEN, ANDERS: Undersökning med svepeelektronmikroskop av fyra typer högtrycksånghärdad gasbetong. Kap. 2 af Samband mellan Struktur och Egenskaper hos Byggnadsmaterial. LTH 1972, Rapport 29.
- [30] NIELSEN, A.F.: Gamma-Ray-Attenuation used for Measuring the Moisture Content and Homogeneity of Porous Concrete. Building Science, Vol. 7, pp 257-263, 1972.
- [31] NIELSEN, A.F.: Measurements of condensation in solid flat roofs of cellular concrete. Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 27, 1973.
- [32] NIELSEN, A.F.: Measurements of drying-out on cellular concrete. Laboratoriet for Varmeisolering, meddelelse nr. 26, 1973.
- [33] PIHLAJAVAARA, S.E.: Estimation of the drying of concrete. RILEM/CIB symposium, Helsinki 1965.
- [34] RADJY, F.: Diffusion and Permeability. Kap. 21, kompendium i bygningsmateriallære. Teoretisk del, DTH 1971.
- [35] SANDBERG, P.I.: Icke Stationär Fukttransport. Institutionen för Byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola, 1970.

- [36] SANDBERG, P.I.: Samtidig ångdiffusion och luftströmning genom ett poröst material. Rapport nr. 27, Institutionen för Byggnadsteknik, Lund 1971.
- [37] SANDBERG, P.I.: Byggnadsdelars Fuktbalans i Naturligt Klimat. Institutionen för Byggnadsteknik, Rapport 43, LTH 1973.
- [38] SCHWARTZ, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur Heft 7, 1972.
- [39] SNECK, T., L. KINNUNEN & H. OINONEN: Measurements of pore size distribution of porous materials. The State Institute for Technical Research, intern foreløbig rapport, Finland 1966.
- [40] SNECK, T. & H. OINONEN: Measurements of pore size distribution of porous materials. Otaniemi, Finland 1970.
- [41] SOMER, E.: The BASC Combined Soil Moisture/Density Gauge and other Moisture/Density Equipment produced by NEA, Copenhagen.  
International Symposium: Radiometric Methods and Instruments for the Determination of Density and Moisture of Building Materials and Soils. Brno, Czechoslovakia 29-31 October 1969.
- [42] TVEIT, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Oslo 1966.
- [43] VACHAUD, G.: Theses presented at the School of Science of the University of Grenoble to acquire the degree of Doctor in Physical Sciences.  
Contribution to the study of flow problems in unsaturated porous media. 1968.
- [44] VOS, B.H.: Condensation in Structures. Report no. BI-67-33/23p14, March 1967, TNO, Holland.
- [45] VOS, B.H. & E. TAMMES: Moisture and moisture transfer in porous materials. TNO report no. BI-69-96/03.1.001, 1969.

## APPENDIX 1

Opsugning

## Teori

Anbringes et materiale i kontakt med vand, vil der ske en ændring i materialets fugtindhold, idet der opsuges vand. Denne opsugning følger ligningen:

$$m = A \cdot \sqrt{t}$$

hvor  $m$  er fugtmængden pr. arealenhed  $[\text{kg}/\text{m}^2]$   
 $A$  er kapillaritetstallet  $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{s}^{0,5}]$   
 $t$  er tiden  $[\text{s}]$

SCHWARZ [38] (KÜNZEL [23]) har udført opsugningsforsøg med gasbeton og fundet en opsugningskurve, som ses på fig. A.1.

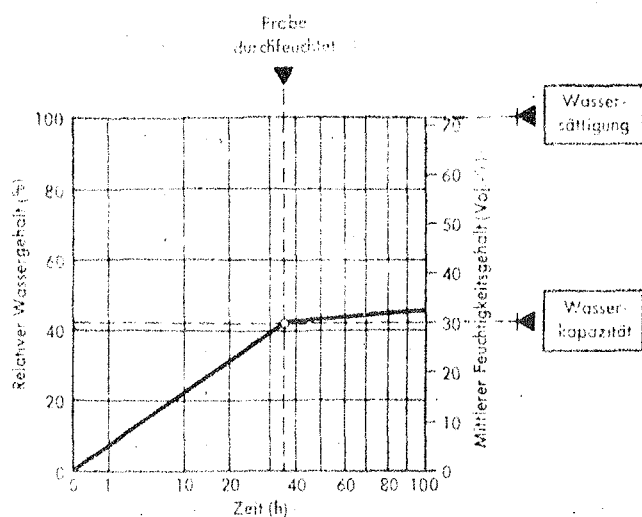


Bild 2. Kapillare Wasseraufnahme einer Gasbetonprobe in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit. Auf der rechten Seite des Diagrammes sind die kennzeichnenden Punkte im Verlaufe der Wasseraufnahme eingetragen.

$W_s$  absolute Sättigung des Materials mit Wasser (unter Vakuum), entspricht praktisch dem Porenanteil des Materials in Vol.-%.

$W_k$  Wasserkapazität des Materials.

Wasseraufnahme des Materials bei einem Saugversuch im Moment der Durchfeuchtung.

Fig. A.1. Opsugning i gasbeton. Fugtindhold i afhængighed af kvadratroden på tiden. SCHWARZ [38].

Absorption of water in cellular concrete.  
 Moisture content versus the square root of the time. SCHWARZ [38].

Heraf fremgår det, at kapillaritetstallet er konstant, indtil prøven er gennemvædet. Prøven er gennemvædet, når hele prøvens overflade er våd. På dette tidspunkt ændres opsugningshastigheden væsentligt, idet den bliver meget langsommere. Dette skyldes, at der nås et fugtindhold, som man har kaldt det kritiske fugtindhold. Under dette fugtindhold indeholder materialet stadig et sammenhængende, luftfyldt poresystem, og over det kritiske fugtindhold findes luften som en række adskilte lommer med væske imellem. Dette forhold bevirker, at opsugningshastigheden falder, når det kritiske fugtindhold nås, idet luften nu ikke længere kan undvige fra materialet gennem et åbent poresystem. Luften er her tvunget til at blive opløst i vandet for at slippe bort, og dette er en meget langsom proces. Dette forklarer også, hvorfor det er nødvendigt at anvende vacuum for at vandmætte porøse materialer inden for en rimelig tid.

Af opsugningsforsøg kan foruden kapillaritetstallet bestemmes en anden karakteristisk størrelse, indtrængningstallet, bestemt ved sammenhængen:

$$x = B \cdot \sqrt{t}$$

hvor  $x$  er afstanden fra sugefladen til væskefronten [m]

$B$  er indtrængningstallet [ $\text{m/s}^{0,5}$ ]

$t$  er tiden [s]

Bestemmelserne af koefficienterne  $A$  og  $B$  har man fundet ud fra vejninger, tidtagning og længdemåling, og de har derfor været enkle at bestemme. Der opstår først problemer, når man også vil bestemme fugtfordelingerne. Her kan benyttes destruktive metoder (veje-tørre) eller metoder, som kræver kalibrering. Når størrelserne  $A$  og  $B$  ved forsøg er fundet konstante, er der tale om en tilnærmelse. Det må bl.a. bemærkes, at tyngdekraften vil influere på resultaterne.



Egne forsøg

Der er anvendt et 15 cm højt, cylindrisk gasbetonprøvelegeme med diameter 121 mm, som blev beklædt på cylinderfladen samt den ene ende med en diffusionstæt asfaltbelægning (fig. A.2).

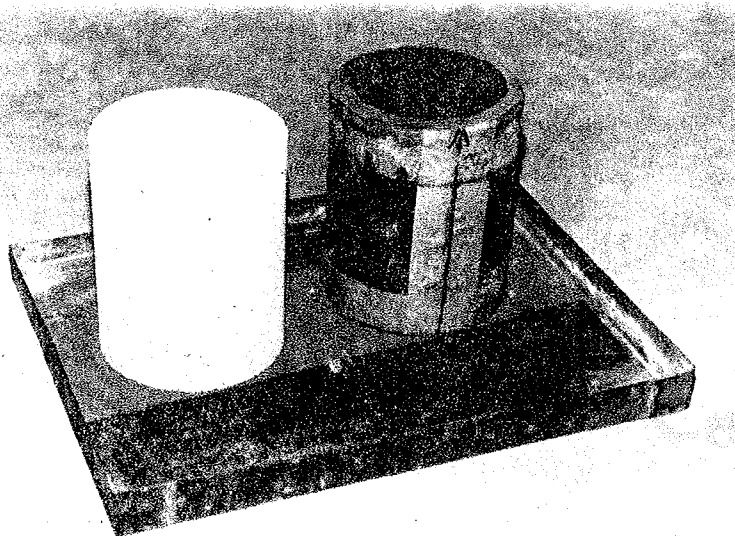


Fig. A.2. Prøvelegemer med og uden diffusionstæt belægning anbragt i vandbad.

Specimens with and without diffusiontight cover placed in a water bath.

Herefter blev der målt med gammastråling for at fastlægge udgangsværdien (= 2%vol).

Prøvens åbne ende blev derefter sat ned i et vandbad med ca. 5 cm vand omkring prøven. Til forskellige tidspunkter blev prøven derefter taget op og vejjet, og desuden blev fugtfordelingen op gennem cylindren bestemt ved  $\gamma$ -måling i 15 punkter. Dette forsøg har fortsat i 7 mdr. Måleresultaterne fremgår af fig. A.3.

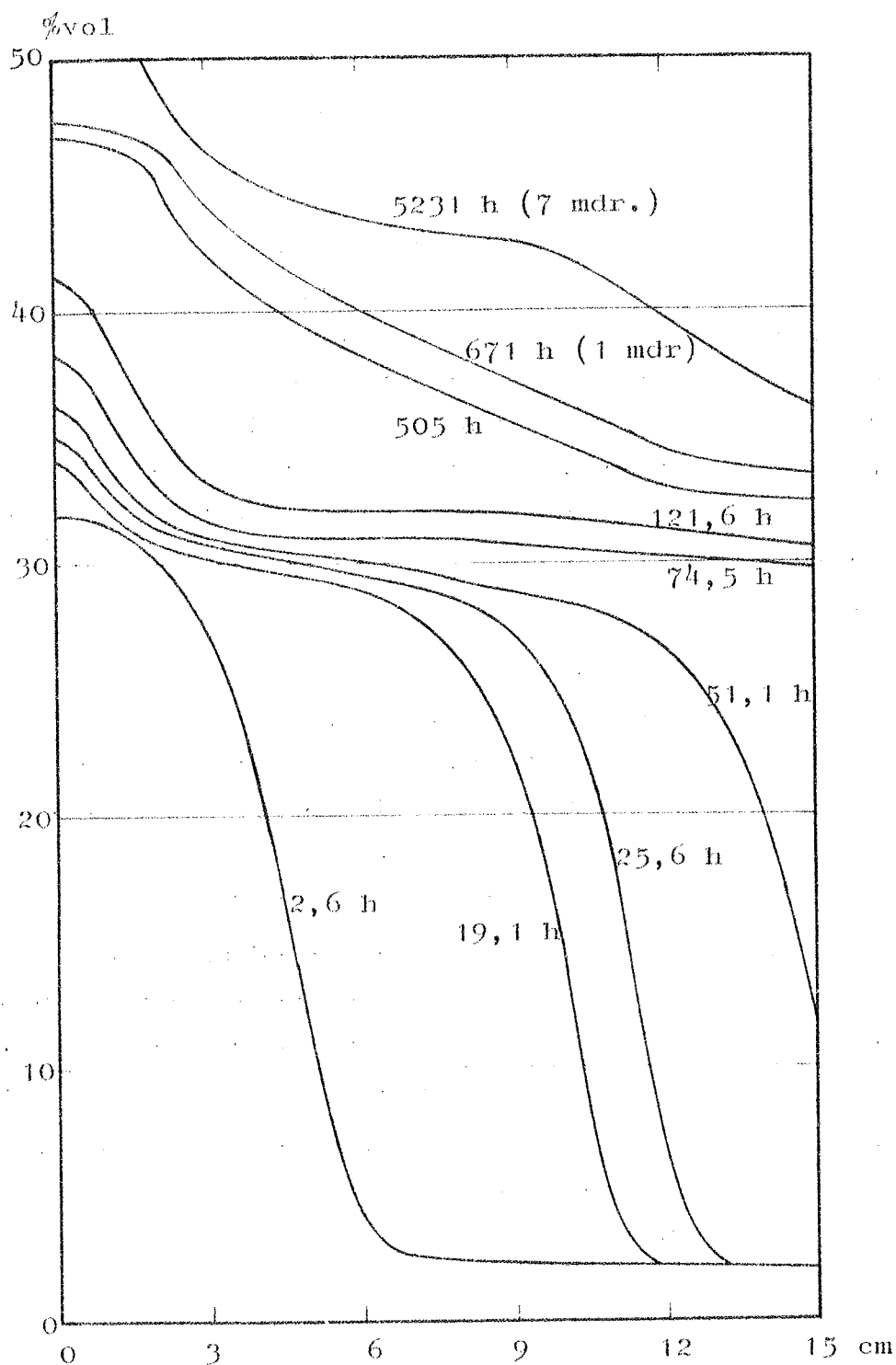


Fig. A.3. Opsugning i gasbeton fra fri væskeoverflade. Fugtindhold i afhængighed af sted. Hver kurve viser fugtindholdet til et givet tidspunkt.

Water absorption in cellular concrete from a free water surface. Moisture content versus place in specimen. Each curve shows the moisture content at a certain time.

Transporten kan opdeles i 2 dele:

1. del fra 0 - 75 h.

I denne periode sker fugttransporten hurtigt, og fugtfrontens form i materialet ser næsten ens ud til de forskellige tidspunkter. Det ses, at fugtfronten, som venteligt, ikke er helt stejl, men fugtindholdet ændrer sig dog kraftigt inden for ca. 3 cm. Ser man på forholdene ved den åbne ende, vil man bemærke, at fugtindholdet stiger langsomt og kun i et område tæt ved den åbne side er højere end de ca. 30% vol, der svarer til det kritiske fugtindhold.

2. del fra 75 h - 7 mdr.

For denne periodes vedkommende vil man bemærke, at fugtindholdet stiger meget langsommere, især ved den lukkede side. Dette skyldes det tidligere nævnte forhold, at luften kun kan slippe ud gennem vandbadet og derfor ved den lukkede side har lang vej at bevæge sig. Ved den åbne side ses det, at fugtindholdet vokser hurtigt, da vejen er kortere.

Optegningen i fig. A.3 er sket på grundlag af målte værdier, og det skal bemærkes, at variationerne i enkelte punkter kan være større end standardafvigelsen på  $\gamma$ -målinger.

Dette skyldes formodentlig forskelle i materialets struktur.

Ud fra kendskabet til fugtfordelingerne er det muligt at beregne kapillarledningstallet, men dette er ikke gjort i denne afhandling.

## APPENDIX 2

EDB-programmer

Disse programmer er alle skrevet i FORTRAN og er skrevet til brug for en IBM 370/165 regnemaskine, som findes ved regnecentret (NEUCC) ved Danmarks tekniske Højskole. En del af programmerne kan ikke umiddelbart overføres til andre regneanlæg, bl.a. plotterprogrammerne. Der er i det følgende givet en kort forklaring på, hvad der beregnes i hvert program, samt en udskrift af de enkelte programmer. Af hensyn til andres brug af programmerne er der omtalt, hvad der skal stå i datakortene ved indlæsningen (INPUT), samt hvilke resultater (OUTPUT) der kan fås af programmerne. Der er ialt 6 programmer:

1. Beregning af korrigerede fugtfordelinger.
2. Beregning af polynomial regression på fugtfordelinger.
3. Udtegnning af fugtfordelinger.
4. Udtegnning af fugt- eller temperaturfordelinger.
5. Beregning af kapillarledningstal.
6. Beregning af kondensation i et tag.

De målte temperaturer og fugtindhold blev ved forsøgene skrevet ud på hulstrimler, som blev konverteret til hulkort (ialt ca. 150.000). Disse hulkort har fået en standardiseret opbygning, så det er let at lade maskinen sortere og udvælge netop de ønskede. Desuden bliver en række af resultaterne af beregningerne også skrevet ud i hulkortform, som så kan anvendes til input for andre programmer. De følgende sider viser disse standardformats, som i det senere omtales som f.eks. format 24.



CARD TYPE NO. 22, MOISTURE DISTRIBUTION MEASURED BY GAMMA-RADIATION

specimen no.	card type	experimental time (h)	Blank	wet weight (g)	measuring method	calculation method	Moisture content $\psi$ (%vol) and standard deviation $\sigma$ ( $\psi$ ) in the specified heights (mm) $\sigma \cdot 10^{+2}$												personal mark	
I3	I2	F6.1	4X	F6.2	I2	I2	45	40	35	30	25	20	15	10	5	$\psi$	$\sigma$	F4.2	I2	I1
							$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\psi$	$\sigma$	F4.2	I2	I2

Card type no. 24. Corrected moisture distribution so that the mean moisture content from gamma-ray measurements and the weighted moisture content are the same.

CARD TYPE NO. 26. POLYNOMIAL REGRESSION, CALCULATED FROM CARD TYPE NO. 22.

[illegible]

Card type no. 27. same as no. 26., only calculated from card type no. 24.

CARD TYPE NO. 33. TEMPERATURE AND HUMIDITY IN CLIMATE BOX OR ROOM.

$n$  is number of measurements  
 $\sigma$  is standard deviation

### 1. Beregning af korrigerede fugtfordelinger

Programmet beregner til et givet tidspunkt en ny fugtfordeling ud fra den med gammatransmissionsudstyret målte fugtfordeling, således at middelfugtindholdet i den korrigerede fugtfordeling bliver det samme, som fås ud fra veje-tørre metoden.

Når gammatransmissionsmålingens middelfugtindhold ikke er det samme, som beregnes ud fra veje-tørre metoden, skyldes det, at kalibreringskurven for svækkelseskoefficienten for vand (fig. 4.2.) ikke er helt korrekt.

#### INPUT

1. kort

Format 16

2. kort

Format 22      n-gange

Blank til slut

#### OUTPUT

PUNCH

Format 24      n-gange

PRINT

Format 22 og 24



```

DIMENSION TT(9),TS(1),IT(9),IV(9)
WRITE(6,12)
12 FORMAT(1H0,10X,21HMCISTURE DISTRIBUTION/10X,20HMEAN GAMMA = MEAN %
WEIGHING//)
4 READ(5,1)NR,NR1,PR1,TV,VOL
1 FORMAT(13,12,F6.1,5X,F6.2,5X,F6.1)
IF(NR1.EQ.0) GO TO 100
WRITE(6,21)NR,11,PR1,TV,VOL
21 FORMAT(1H0,5X,15H SPECIMEN NUMBER,15,5X,10H CARD TYPE,15/1H0,5X,4FT
11ML,F16.1,5X,15H DRY-WEIGHT,F16.2,7HVOLUME,F12.2/)
IF(NR1.EQ.10)GO TO 3
WRITE(6,2) NR,1,1,PR1
2 FORMAT(1H0,17HWRG,C CARD INCH-AT,15,15,F10.1/)
GO TO 4
3 READ(5,5) NR2, NR3,PR2,TV1,NBV,NAL,( TT(J),IT(J) ,J=1,9)
5 FORMAT(13,12,F6.1,4X,F6.2,12,12,5(F4.2,12))
IF(NR3.EQ.22) GO TO 6
IF(NR2.EQ.0)GO TO 4
WRITE(6,2) NR2,NR3,PR2
GO TO 3
6 IF(NR2.EQ.NR) GO TO 7
WRITE(6,2) NR2,NR3,PR2
GO TO 3
7 WA=((TV1-TV)/VOL)*100
TOT=0.0
MAL=1.0-NAL
NR4=24
IW2=IFIX(PR2*100)
IW2=IFIX(WA*100)
IF((TT(5).LT.0.01.AND.TT(9).LT.0.01) GO TO 15
DO 8 I=2,3
TOT=TOT+TT(I)
8 CONTINUE
WG=(TOT+(TT(1)+TT(9))*1.0)/10.0
FAK=WW/WG
DO 9 I=1,9
TS(I)=FAK*TT(I)
9 IV(I)=IFIX(TS(I)*100)
IW1=IFIX(WG*100)
WRITE(6,11)
11 FORMAT(1H0,5X,3HNO,5H CARD,5X,4H TIME,2X,15HWATER CONTENT,10X,18FW
1ATLR DISTRI BUT119,63X,3HCAL)
WRITE(6,13) PR2,NR3,PR2,TV1,( TT(J),IT(J) ,J=1,9),NAL
13 FORMAT(1H0,5X,13,15,F6.1,F14.2,5(F6.2,14),14)
WRITE(6,14) NR2,NR4,PR2,WG,WA,( TS(J),IT(J) ,J=1,9),MAL
14 FORMAT(1H0,5X,13,15,F6.1,2F7.2,9(F6.2,14),14)
WRITE(7,1) NR2,NR4,IW1,IW2,NBV,NAL,( IV(J),IT(J) ,J=1,9)
15 FORMAT(13,12,15,15,12,12,5(14,12))
GO TO 3
16 DO 16 I=1,5
TOT=TOT+IT(I)
WG=TOT/5.0
FAK=WW/WG
DO 17 I=1,5
TS(I)=FAK*IT(I)
17 IV(I)=IFIX(TS(I)*100)
IW1=IFIX(WG*100)
WRITE(6,11)
WRITE(6,14) NR2,NR3,PR2,TV1,( TT(J),IT(J) ,J=1,5),NAL

```

```

18 FORMAT(1H0,5X,I7,I5,IY02,F1002,2(F502,I4),40X,I4)
   WRITE(6,18) NRP,RL4,PR0,55,WH,( ID(J),IT(J) ,J=1,5),MAL
19 FORMAT(1H0,5X,I7,I5,F501,2F702,5(F502,I4),40X,I4)
   WRITE(7,19) NRP,RP4,RL4,IY1,IY2,MAL,( IV(J),IT(J) ,J=1,5)
20 FORMAT(10,I2,I0,2I5,2X,I2,5(I0,I2))
   GO TO 5
100 STOP
END

```

## 2. Beregning af polynomial regression på fugtfordelinger

Programmet beregner koefficienterne til en 2. grads tilnærmelse for fugtfordelingen til et givet tidspunkt ved brug af mindste kvadraters metode. Resultatet af beregningerne kan f.eks. ses på de optegnede fordelinger i fig. 5.16.

For at undgå for store fejl i tilnærmelsen beregnes først randpunkterne (overfladerne af prøvelegemet) ud fra de nærmeste målepunkter ved brug af f.eks. 1. grads eller 2. grads kurve. Herefter beregnes ud fra disse ialt 11 punkter den bedste 2. grads tilnærmelse. For at få rimelige værdier benyttes tilnærmelserne:

$$\begin{aligned} x < x_0 & \quad y = a + bx + cx^2 \\ x > x_0 & \quad y = a + bx + cx^2 + d(x - x_0)^2 \end{aligned}$$

hvor  $y$  er fugtindholdet  $0 > x > 78\%$  vol  
 $x$  er stedet  $0 > x > 5$  cm  
 $x_0$  er delepunktet mellem de 2 parabler  
 $a, b, c$ , og  $d$  er koefficienter

Programmet beregner  $a, b, c, d$  og  $x_0$  ud fra mindste kvadraters metode.

### INPUT

1. kort. Styring af udskrifter.

$I1 = 0$  ingen udskrift af input (format 22 eller 24)  
 $= 1$  udskrift af input  
 $I1 = 1$  udskrift af output (format 26 eller 27)

2. kort. Beregning af randpunkter.

4x 4 blanke  
 $I2$  venstre side ( $x=50$  mm) polynomiets grad  
 4x 4 blanke  
 $I2$  venstre side, antal punkter, der anvendes til polynomiet  
 4x 4 blanke

I2 højre side ( $x=0$  mm) polynomiets grad  
4x 4 blanke  
I2 højre side, antal punkter, der anvendes til  
polynomiet

3. kort.

Format 22 n-gange (eller format 24)  
Blankt kort til slut.

#### OUTPUT

WRITE 9

Format 26 eller 27 kan skrives ud som hulkort eller  
indlægges i et datasæt og anvendes som input for  
plotterprogram (nr. 3 eller nr. 5).

PRINT

Udskrift af eventuelle fejl i format 22 eller 24,  
x-værdier, y-værdier målt, y-værdier beregnet,  
y-værdier fra bedste tilnærmelse samt konstanterne  
 $x_0$ , a, b, c og d.

```

DIMENSION X(21),Y(13),Z(14,25),A(4,4),B(11),C(4),YM(25),YP(25),NP(5
1)
YMA=75.0
YMI=2.0
READ(5,30) I11,NYP
62 FORMAT(2I1)
READ(5,30) I1,I2,I3,I4
63 FORMAT(4(4X,I2))
WRITE(6,76) NYP
76 FORMAT(1H0,9F10.4,15//)
WRITE(6,80) I1,I1,I2,I3,I4
69 FORMAT(1H0,3F17.10,2X,4HLEFT,2I1,2X,5HRIGHT,2I3)
N=11
DO 21 I=1,N
2 X(I)=0.0-0.05*FLOAT(I)
4 READ(5,62) NR,I1,PR1,NAL,(Y(J),J=2,10)
62 FORMAT(13,I3,F4.1,10X,I2,3(F4.2,2X))
IF(NR1.EQ.22.OR.NR1.EQ.24) GO TO 63
WRITE(6,64) NR,I1,PR1,NAL
64 FORMAT(1H0,17H%KINC CARD FORMAT,15,15,F10.1,15//)
IF(NR1.EQ.0) GO TO 3
GO TO 4
63 YM(12)=10.00000
YP(12)=10.70000
YP(13)=-10.0
IF(NR1.EQ.22) NR4=26
IF(NR1.EQ.24) NR4=27
WRITE(6,65) NR,I1,PR1,NAL
65 FORMAT(23HPOLYNOMIAL REGRESSION/16H SPECIMEN NUMBER,15,5X,10HCARD
1 TYPE,15/5H TIME,F10.1,5X,11H CALIBRATION,15)
DO 21 I=1,11
DO 21 J=1,12
NCP=I-1
NCR=J+1
21 Z(I,J)=X(NCR)**NCP
DO 22 I=1,11
DO 23 J=1,1
S=0.0
DO 23 K=1,12
S=S+Z(I,K)*Z(J,K)
A(I,J)=S
23 A(J,1)=S
S=0.0
DO 23 K=1,12
S=S+Y(K+1)*Z(I,K)
22 S(I)=S
CALL FIT(I,A,J,C)
Y(1)=C(1)
I6=I1-1
DO 40 I=1,I6
4 Y(1)=Y(1)+C(I+1)*A(1)*I
IF(Y(1).GT.YMA) Y(1)=YMA
IF(Y(1).LT.YMI) Y(1)=YMI
DO 24 I=1,13
DO 24 J=1,14
NCR=I-1
NOR=J+1-(14+1)
24 Z(I,J)=X(NOR)**NOR
DO 25 I=1,13

```

```

DO 20 J=1,1
S=0.0
DO 20 K=1,14
S=S+Z(I,K)*Z(J,K)
A(I,J)=S
20 A(J,I)=S
S=0.0
DO 20 K=1,14
MOD=K+11-(14+1)
S=S+Y(MOD)*Z(I,K)
20 B(I)=S
CALL CIP(IJ,A,B,C)
Y(11)=C(1)
IF(Y(11).GT.YMA) Y(11)=YMA
IF(Y(11).LT.YMI) Y(11)=YMI
DO 10 ID=3,30
X0=1.04+C01*FLOADY(ID)
DO 11 I=1,3
DO 11 J=1,N
MOD=I-1
IF(J.LT.2) Z(1,J)=0.0
IF(J.GT.4) GO TO 11
Z(1,J)=X(J)*MOD
11 CONTINUE
DO 12 J=1+N
Z(4,J)=(X(J)-X1)*Z1
IF(X(J).LT.XC) Z(4,J)=0.0
12 CONTINUE
DO 13 I=1,4
DO 14 J=1,1
S=0.0
DO 14 K=1,N
S=S+Z(I,K)*Z(J,K)
A(I,J)=S
A(J,I)=S
14 CONTINUE
S=0.0
DO 13 K=1,N
S=S+Y(K)*Z(1,K)
B(1)=S
C(1)=S
13 CONTINUE
CALL SINGQ(A,C,0,K3)
IF(K3.LT.0) GO TO 15
WRITE(6,10)
10 FORMAT(100,'SINGULAR MATRIX')
GO TO 10
15 YMAX=C(3)
YMIN=C(2)
DO 17 I=1,51
XA=-1.01+C01*FLOADT(I)
YA=C(3)+1.01*C(3)*XA+C(4)*(XA-X0)*2.0
IF(XA.LT.0) YA=C(2)+2.01*C(3)*XA
IF(YA.GT.YMAX) YMAX=YA
IF(YA.LT.YMIN) YMIN=YA
17 CONTINUE
G=0.0
DO 18 I=1,N
ENIS=C(1)+C(2)*X(I)+C(3)*X(I)*2+C(4)*(X(I)-X0)*2-Y(I)

```

```

      IF(X(1).LE.XC) 31ID=C(1)+C(2)*X(1)+C(3)*X(1)**2-Y(1)
      G(1)=DRIS+Y(1)
      G=G+GRIS**2
13  CONTINUE
      IF(G.GT.YM(19)) GO TO 34
      YM(19)=G
      YM(18)=YMIN
      YM(17)=YMAX
      YM(16)=C(4)
      YM(15)=C(3)
      YM(14)=C(2)
      YM(13)=C(1)
      YM(12)=XC
      DO 32 NQ=1,11
32  YM(NQ)=D(NQ)
30  IF(YMIN.LT.YP(13)) GO TO 31
      YP(19)=G
      YP(18)=YMIN
      YP(17)=YMAX
      YP(16)=C(4)
      YP(15)=C(3)
      YP(14)=C(2)
      YP(13)=C(1)
      YP(12)=XJ
      DO 33 NQ=1,11
33  YP(NQ)=D(NQ)
31  CONTINUE
10  CONTINUE
      LA=0
      NP1=IFIX(PI*PI*10)
      IF(III.LQ.0)GO TO 72
      DO 73 N1=2,10
      YEST=Y(N1)*100.
      N1X=N1-1
73  NP(N1X)=IFIX(YEST)
      WRITE(9,69)NR, NR1,NP1,NAL,(NP(J),J=1,9)
69  FORMAT(13,12,15,12X,12,9(14,2X))
72  CONTINUE
      IF(NYP.LQ.0) GO TO 74
      WRITE(9,67)NR,NR4,NP1,NAL,LA,(YP(J),J=12,16)
      GO TO 75
74  CONTINUE
      WRITE(9,67)NR,NR4,NP1,NAL,LA,(YM(J),J=12,16)
67  FORMAT(12,12,16,12,11,5(13,3))
75  CONTINUE
      WRITE(5,55)(X(1),I=1,11)
55  FORMAT(5H PLA,11F10.2)
      WRITE(5,27)(Y(1),I=1,11)
27  FORMAT(5H MES,11F10.2)
      WRITE(5,61)(YM(1),I=1,11)
61  FORMAT(5H BUST,11F10.2)
      WRITE(5,22)(YP(1),I=1,11)
22  FORMAT(5H DEV,11F10.2)
      WRITE(5,24)
24  FORMAT(1HJ,5X,2,1XJ,5X,4HC(1),9X,4HC(2),9X,4HC(3),9X,4HC(4),9X,4FY
1AX,9X,4HYMIN,19X,3HG*3)
      WRITE(5,13)(YM(1),I=12,13)
13  FORMAT(2H L,EE13.4)
      WRITE(5,53)(YP(1),I=12,13)

```

```

38 FORMAT(2H 0,8D3,4)
GO 1) 4
3 CONTINUE
STOP
END
SUBROUTINE FIT(MN,A,B,C)
DIMENSION A(4,4),B(4),C(4)
NM1=MN-1
DO 1) 35 K=1,NM1
KP1=K+1
L=K
DO 40 I=KP1,MN
IF (ABS(A(1,L))-A(B(L,K))) 4),40,41
41 L=1
40 CONTINUE
IF (L=K) 3) 40,40
43 DO 42 J=K,MN
TE=A(K,J)
A(K,J)=A(L,J)
42 A(L,J)=TE
TE=B(K)
B(K)=B(L)
B(L)=TE
55 DO 56 I=KP1,MN
FAK=A(1,K)/A(K,K)
A(1,K)=0.0
DO 61 J=KP1,MN
61 A(1,J)=A(1,J)-FAK*A(K,J)
35 B(1)=B(1)-FAK*B(K)
C(MN)=C(MN)/A(1,MN)
I=MN1
71 IP1=I+1
SUM=0.0
DO 70 J=IP1,MN
70 SUM=SUM+A(1,J)*C(J)
C(1)=(B(1)-SUM)/A(1,1)
I=I-1
IF (I) 35,35,71
40 RETURN
END

```



### 3. Udtegning af fugtfordelinger

Programmet optegner fugtfordelingerne i et prøvelegeme til de tidspunkter, hvor der er målt. Resultatet af en optegning kan f.eks. ses på fig. 6.16.

På figuren indtegnes de målte punkter samt de beregnede fugtfordelinger.

#### INPUT

##### 1. kort.

10A4 første linie: tekst under figur  
10A4 anden linie: tekst under figur

##### 2. kort.

I3 prøvelegemenummer, der optegnes  
I2 korttype, der indlæses med fugtindhold  
(format 22 eller 24)  
F5.1 Y-aksens (fugtindholdets [%vol]) maksimale  
værdi ved plottet.

#### INPUT

(READ 9)

Format 22 eller 24 }  
Format 26 eller 27 } til samme tidspunkt  
gentages n-gange  
2 blanke til slut.

#### OUTPUT

Plot, se f.eks. fig. 5.16.

Printkort 2. samt evt. fejl i kortformat.

```

    DIMENSION TT(9),COL(5),TA(10),TE(10),TC(3),X(51),Y(51),C(4)
    WRITE(5,2)
2  FORMAT(1H0,22H PLOT OF MOISTURE DISTRIBUTION//)
    READ(5,3)((TA(J),J=1,10),(TE(J),J=1,10)
8  FORMAT(20A4)
20 READ(5,9) NR5, NR6, FG
9  FORMAT(12,12,F5.1)
    IF(NR5.EQ.22.OR.NR6.EQ.24) GO TO 21
    GO TO 20
21 IF( NR6.EQ.22) NR7=26
    IF(NR6.EQ.24) NR7=27
    WRITE(6,10) NR5, NR6, FG
10  FORMAT(1H0,15H SPECIMEN NUMBER,15,5X,5H CARD TYPE,15/22H MAX MOISTU
    RE CONTENT,F5.1)
    CALL PARCALF(20,25)
    CALL FACTOR(5.1)
    FGT=FG/5.
    FAT=FGT/25.
    NR=-1
    NG=-1
6  READ(9,1,END=105) NR,NR1,KR1,NAL,(TT(J),J=1,9)
1  FORMAT(13,12,15,12X,12,9(F4.2,2X))
    READ(9,4,END=105) NR2,NR3,KR3,MAL,X(1),(C(J),J=1,4)
4  FORMAT(13,12,15,12,1X,DE17.5)
    NFEJL=0
    IF(NR5.NE.NR6) NFEJL=1
    IF(NR2.NE.NR3) NFEJL=2
    IF(NR1.NE.NR6) NFEJL=3
    IF(NR3.NE.NR7) NFEJL=4
    IF(KR1.NE.KR3) NFEJL=5
    IF(NAL.NE.MAL) NFEJL=6
    IF(NFEJL.NE.0) GO TO 3
    WRITE(6,5) NFEJL,NR,NR1,KR1,NAL,NR2,NR3,KR3,MAL
5  FORMAT(11Z,17H LONG CARD FORMAT,15/15,15,11Z,15/15,15,11Z,15/)
    IF(NR.EQ.9) GO TO 105
    GO TO 6
3  PR1=FLOAT(KR1)/1.
    NB=NB+1
    NG=NG+1
    IF(NG.EQ.13) NG=0
    U=23%-10%*FLOAT(NB)
    YMAAL=23%/FG
    IF(U.LE.0) GO TO 105
    IF(TT(6).LT.0.1.AND.TT(9).LT.0.01) GO TO 23
    DO 11 I=1,9
    X(I)=-0.5*FLOAT(I)+5.0
11 Y(I)=TT(I)
    CALL KURVC(X,Y,1,-20,YMAAL,0,0,0,NG,2)
    GO TO 24
23 DO 25 I=1,5
    X(I)=5.5-1.0*FLOAT(I)
25 Y(I)=TT(I)
    CALL KURVC(X,Y,5,1,-20,YMAAL,0,0,0,NB,2)
24 CONTINUE
    CALL DYADOL(10,0,3,NR,6,-1)
    CALL NUMBER(15,0,5,PR1,0,1)
    DO 12 I=1,51
    X(I)=5.1-0.1*FLOAT(I)
    Y2=Y(I)

```

```

Y(1)=C(1)+C(2)*YR+C(3)*YR**2+C(4)*(YF-X0)**2
IF(YR<LT0X0)Y(1)=C(1)+C(2)*YR+C(3)*YR**2
12 CONTINUE
CALL KURVE(X,Y,51,1,-200,YMAAL,00,00,-1,12,20)
GO TO 6
105 CALL PLOT(1000,00,2)
CALL AXEL(-1000,00,2000,900,50,FGT,FAT,50,1,1,1,10,10)
CALL PLOT(00,00,2)
CALL PLOT(00,2000,1)
CALL PLOT(-1000,2000,1)
CALL SYMBOL(-1100,-200,50,TA,00,40)
CALL SYMBOL(-1100,-200,50,TD,00,40)
CALL SYMBOL(-1000,-400,50,34THERMAL INSULATION LABORATORY 1973,00
1,34)
CALL SYMBOL(-1100,200,50,17HSPECIMEN NUMBER =,00,17)
ARS=FLOAT(HRL)
CALL NUMBER(00,2300,50,ARS,00,-1)
CALL SYMBOL(-1100,-200,50,17HCARD TYPE =,00,17)
ARE=FLOAT(HRE)
CALL NUMBER(00,2300,50,ARE,00,-1)
CALL SYMBOL(-1100,2100,50,17HCALIBRATION NO. =,00,17)
AAL=FLOAT(NAL)
CALL NUMBER(00,2100,50,AAL,00,-1)
CALL SPLJLY
CALL AXEL(00,00,1000,1300,00,10,0005,50,-1,0,0,-10,10)
CALL PLTEND
STOP
END

```

#### 4. Udtegning af fugt- eller temperaturfordelinger

Programmet optegner fugt- eller temperaturfordelinger i afhængighed af tiden i den ønskede målestok. Resultaterne af programmet kan f.eks. ses på fig. 6.12.

Programmet tegner en linie for hvert målepunkt (bestemt sted i prøvelegemet) i afhængighed af tiden, således at alle værdier, der ligger uden for visse grænser, bortkastes. Dette er af betydning, når nogle kanaler pludselig giver helt forkerte resultater. Programmet beregner for hvert målepunkt middelværdier og standardafvigelsen for målingen.

##### INPUT

##### 1. kort

18A4 overskrift på plot

##### 2. kort

4x

I2 angiver korttypen, der skal tegnes, f.eks.  
22, 24, 30, 33

3x

I3 prøvelegeme nr. eller klimaskab nr.

3x

I1 =1 markering af indlæste punkter  
=0 ingen markering

3x

F6.0 tidskorrektion [h] på x-aksen (fratrækkes inden plot fra tiden)

3x

F4.1 temperatur- [°C] eller fugtkorrektion [%vol] på y-aksen (fratrækkes inden plot fra værdierne)

3. kort x-aksen }  
4. kort y-aksen } samme format

4x

F4.0 længde af aksens i mm

F6.0 startværdi på aksens [°C] eller [%vol]

F6.0 slutværdi på aksens

F4.0 antal af intervalinddelinger på aksens

F4.0 størrelse af tal ved aksens (mm)

5. - 9. (13.) kort.

4x

F4.1 nedre grænseværdi

4x

F4.1 øvre grænseværdi

værdier udenfor bort-  
kastes inden plotning

5 - 9 ved temperatur-plot

5 - 13 ved fugtfordelings-plot

### INPUT

READ 1

Op til 500 sæt målinger i korttypen, der angives  
i 2. kort, f.eks. 24.

Blank til slut.

### OUTPUT

Plot se f.eks. fig. 6.12.

Print af indlæste data samt middelværdier, standardafvigelse og oplysning om, hvor mange værdier der ligger uden for grænseværdierne.

```

DIMENSION TIME(100),TDV(20),TMA(500)
DIMENSION P1(500),P2(500),TMIN(9),TMAX(9),AV(9)
IE=0
IST=0
ICC=0
ICO=0
READ(5,1) (TDV(I),I=1,19)
1 FORMAT(20A4)
READ(5,3) ICT,INH,IPKT,IFOR,CKOR,DAT
2 FORMAT(4X,I2,3X,I3,3X,I1,3X,F6.0,3X,F4.1,3X,I1)
IF(ICT.EQ.30)IE=3
IF(ICT.EQ.21.OR.ICT.EQ.22)IE=3
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.913)IE=4
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.908)IE=4
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.907)IE=4
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.901)IE=2
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.912)IE=2
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.913)IE=2
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.904)IE=2
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.903)IE=2
IF(ICT.EQ.33.AND.INH.EQ.906)IE=2
IF(IE.EQ.0)GO TO 100
READ(5,6) TFX,TFX,TSX,TIY,ITX
6 FORMAT(4X,I4,3X,F6.0,3X,F6.0,3X,F4.0)
READ(5,4) TLY,TFY,TSY,TIY,TTY
TFX=TFX-T-OR
TSX=TSX-IFOR
IF(IE.EQ.3)GO TO 41
GO 4 I=1,9
READ(5,5) TMIN(I),TMAX(I)
5 FORMAT(4X,F4.1,4X,F4.1)
4 CONTINUE
WRITE(5,2)
2 FORMAT(1H,32H PLOT OF TEMPERATURE DISTRIBUTION//)
IF(ICT.EQ.33)GO TO 29
WRITE(5,25)ICT,INH,IPKT
25 FORMAT(1H,16H CARD TYPE ,10X,IH=,13/IH0,15H SPECIMEN NUMBER,5X,IH=,
13/IH0,15H POINT MARKING,7X,IH=,13//)
29 IF(ICT.EQ.30)GO TO 30
WRITE(5,31)IPKT,IPKT
31 FORMAT(1H,16H CARD TYPE ,10X,IH=,33/IH0,15H CLIMATE BOX NO.,5X,IH=,
13/IH0,15H POINT MARKING,7X,IH=,13//)
32 WRITE(5,32)
32 FORMAT(1H,31H LIMITS OF TEMPERATURE VARIATIONS)
WRITE(5,33)(1,TMIN(I),TMAX(I),I=1,9)
33 FORMAT(1H,12,4X,5H MIN =,F7.1,3X,5H MAX =,F7.1)
WRITE(5,34)TFX,TFX,TSX,TIY,ITX
34 FORMAT(//15H LENGTH(M),2X,5H FIRST(H),2X,7H LAST(H),2X,5H INTERV
AL,2X,5H SIZE(M)/3H0 X,5X,F6.0,5X,F6.0,4X,F6.0,5X,F4.0)
WRITE(5,35)TLY,TFY,TSY,TIY,TTY
35 FORMAT(15H LENGTH(M),2X,5H FIRST(C),2X,7H LAST(C),2X,5H INTERV
AL,2X,5H SIZE(M)/3H0 Y,5X,F6.0,5X,F6.0,4X,F6.0,4X,F4.0,5X,F4.0)
WRITE(5,36)IFOR,CKOR
36 FORMAT(1H,17H TEMPERATURE CORRECTION =,F6.0/1H0,17H TEMP CORRECTION =,F6.0
//)
41 IF(IE.NE.9)GO TO 42
READ(5,5)(TMIN(I),TMAX(I),I=1,9)
WRITE(5,47)
47 FORMAT(1H,29H PLOT OF MOISTURE DISTRIBUTION//)

```

```

WRITE(6,28) ICT, INR, IPKT
WRITE(6,44)
44 FORMAT(1H0,28HLIMITS OF MOISTURE VARIATIONS)
WRITE(6,33) (1,TMIN(I),TMAX(I),I=1,9)
WRITE(6,34) TLX,TFX,TSX,TIX,TTX
WRITE(6,45) TLY,TFY,TSY,TIY,TTY
45 FORMAT(1SH LENGTH(MM),2X,8HFIRST(M),2X,7HLAST(M),2X,8HINTERVAL
X,2X,6HSIZE(MM)/1H0 Y,5X,F6.0,5X,F6.0,4X,F6.0,4X,F4.0,5X,F4.0)
WRITE(6,46) TFOR,CKCR
46 FORMAT(1HJ,17HTIME CORRECTION =,F6.0/1H0,17HMOIS CORRECTION =,F6.0
X///)
47 IST=IST+1
ISU=500+IST
ISV=1000+IST
ISW=1500+IST
ISX=2000+IST
ISY=2500+IST
ISZ=3000+IST
ISS=3500+IST
ISR=4000+IST
READ(1,48,END=55) INR1,ICT1,TIME(IST),P1(IST),P1(ISU),P1(ISV),P1(
ISW),P1(ISX),P1(ISY),P1(ISZ),P1(ISS),P1(ISR)
48 FORMAT(13,I2,F6.1,14X,9(F4.2,2X))
IF(ICT1.EQ. ICT) GO TO 47
54 IST=IST-1
GO TO 13
42 IF(IE.NE.5) GO TO 7
5 IST=IST+1
ISU=500+IST
ISV=1000+IST
ISW=1500+IST
ISX=2000+IST
ICL=ICC
ICP=ICQ
READ(1,5,END=59) INP1,ICT1,TIME(IST),ICC,ICQ,P1(IST),P1(ISU),P1(
ISV),P1(ISW),P1(ISX)
6 FORMAT(13,I2,F6.1,6X,2I3,3X,F4.1,4(7X,F4.1))
IF(ICT1.EQ. ICT) GO TO 9
59 IST=IST-1
7 IF(IE.NE.4) GO TO 10
12 IST=IST+1
ISU=500+IST
ISV=1000+IST
ISW=1500+IST
READ(1,11,END=61) INR1,ICT1,TIME(IST),P1(IST),P1(ISU),DUM,P1(ISV),
P1(ISW)
11 FORMAT(13,I2,F6.1,9X,F4.1,4(7X,F4.1))
IF(ICT1.EQ. ICT) GO TO 12
59 IST=IST-1
10 IF(IE.NE.2) GO TO 13
14 IST=IST+1
ISU=500+IST
READ(1,11,END=61) INR1,ICT1,TIME(IST),P1(IST),P1(ISU)
IF(ICT1.EQ. ICT) GO TO 14
61 IST=IST-1
13 CONTINUE
CALL PARALF(15,60)
CALL DREJ00(3)
CALL FACTOR(8,1)

```

```

40  DO 17 I=1,12
    TIME(I)=TIME(I)-TSCF
    DO 17 J=1,12
      JAK=0
      JAL=0
      JD=-500+500*I
      JJ=0
      DO 18 J=1,12
        JC=JD+J
        JJ=JJ+1
        IF(P1(J).GE.TMAX(I).OR.P1(JC).LE.TMIN(I)) JJ=JJ-1
        IF(P1(JC).GE.TMAX(I).OR.P1(J).LE.TMIN(I)) JAK=JAK+1
        IF(P1(JC).GE.TMAX(I).OR.P1(J).LE.TMIN(I)) GO TO 18
        IF(TIME(J).LT.TFX.OR.TIME(J).GT.TSX) JJ=JJ-1
        IF(TIME(J).LT.TFX.OR.TIME(J).GT.TSX) JAL=JAL+1
        IF(TIME(J).LT.TFX.OR.TIME(J).GT.TSX) GO TO 18
        TIME(JJ)=TIME(J)
        P2(JJ)=P1(J)-CKCF
        JN=JJ
18  CONTINUE
      IF(JN.EQ.0) GO TO 17
      CALL SALLY(P2,JN,AVL,SDA,AMIN,AMAX)
      WRITE(6,37) I
37  FORMAT(1H0,30H CALCULATIONS OF MEAN VALUE NO.,13)
      WRITE(6,27) AVL,SDA,AMIN,AMAX,JN,JAK,JAL
37  FORMAT(1H0,40HMEAN,12X,1H=,F8.2/1H0,20HSTANDARD DEVIATION =,F12.4/
1H0,10HMIN. VALUE,9X,1H=,F8.2/1H0,10HMAX. VALUE,9X,1H=,F8.2/1H0,10H
20HNUMBER OF VALUES, 3X,1H=,13/1H0,20HOUTSIDE T/M LIMITS=,13/1H0,20H
OUTSIDE TIME LIMITS=,13/1H0,13HVALUES USED =//)
      WRITE(6,32)(N,TIME(N),P1(N),N=1,JN)
39  FORMAT(5(13,F10.1,F10.1))
      AV(I)=AVL
      XMAAL=TLX/(TSX-TFX)
      YMAAL=TLY/(TSY-TFY)
      LIT=-1+10KT
      CALL KULVE(TIME,P2,JN,1,XMAAL,YMAAL,TFX,TFY,LIT,I,100)
17  CONTINUE
      IF(JH.EQ.0) GO TO 100
      TXN=TFX+(TLX-TFX)/TIX
      XI=(TXN-TFX)*TIX/TLX
      CALL AXI(0,0,TLX,0,TFX,TXN,XI,TTX,-1,0,0,-1,10)
      TYN=TFY+(TSY-TFY)/TIY
      YI=(TYN-TFY)*TIY/TLY
      CALL AXI(0,0,TLY,0,TFY,TYN,YI,TLY,-1,1,0,10,10)
      IF(IE.NE.9) GO TO 4
      AA=TLY+100
      AC=TLY+200
      CALL SYMBOL(0,AC,0,TOV,0,72)
      CALL SYMBOL(10,AA,0,17HSPICIMEN NUMBER =,0,17)
      AL=FLAT(INR)
      CALL NUMBER(11,AL,AA,0,AL,0,-1)
      GO TO 100
4) IF(IE.EQ.9) GO TO 15
      AA=TLY+100
      AC=TLY+200
      CALL SYMBOL(0,AC,0,TOV,0,72)
      CALL SYMBOL(10,AA,0,17HCLIMATE BOX NO. =,0,17)
      IA=112-000
      AD=FLAT(IA)

```



```

CALL NUMBER(110,AA,5,AB,0,-1)
15 IF(ICT.EQ.33) GO TO 16
AA=TLX+10
AB=TLX+20
AC=TLX+30
AG=TLX+40
CALL SYMBOL(0,AG,0,TDV,0,72)
CALL SYMBOL(10,AC,5,17HSPECIMEN NUMBER =,0,17)
AD=FLOAT(INR)
AE=FLOAT(ICB-200)
AF=FLOAT(ICP)
CALL NUMBER(110,AC,5,AD,0,-1)
CALL SYMBOL(10,AD,5,17HCLIMATE BCX NO. =,0,17)
CALL NUMBER(110,AB,5,AE,0,-1)
CALL SYMBOL(10,AA,5,17HCOLD PLATE NO. =,0,17)
CALL NUMBER(110,AA,5,AF,0,-1)
16 CONTINUE
AA=TLX+10
AE=TLX+20
AR=TLX+50
IF(ICT.EQ.33) GO TO 20
AD=TLX-20
CALL SYMBOL(AA,AD,4,0,7HHEIGHTS,0,7)
DO 21 I=1,IE
AD=TLX-20-10*I
AVER=AV(1)
CALL NUMBER(AR,AB,4,0,AVER,0,1)
IF(LIT.NE.0) GO TO 19
CALL SYMBOL(AA,AE,2,0,1,0,-1)
19 AC=-5+11*I
21 CALL NUMBER(AE,AB,4,0,AC,0,-1)
20 IF(IE.NE.2) GO TO 22
AB=TLX-30
AC=TLX-40
IF(LIT.NE.0) GO TO 23
CALL SYMBOL(AA,AB,2,0,1,0,-1)
CALL SYMBOL(AA,AC,2,0,2,0,-1)
23 CALL SYMBOL(AE,AB,4,0,9HAIR TEMP,0,9)
CALL SYMBOL(AE,AC,4,0,9HDLW POINT,0,9)
AVER=AV(1)
CALL NUMBER(AR,AB,4,0,AVER,0,1)
AVER=AV(2)
CALL NUMBER(AR,AC,4,0,AVER,0,1)
22 IF(IE.NE.4) GO TO 24
AB=TLX-30
AC=TLX-40
AD=TLX-50
AF=TLX-60
IF(LIT.NE.0) GO TO 25
CALL SYMBOL(AA,AF,2,0,1,0,-1)
CALL SYMBOL(AA,AC,2,0,2,0,-1)
CALL SYMBOL(AA,AD,2,0,3,0,-1)
CALL SYMBOL(AA,AF,2,0,4,0,-1)
25 CALL SYMBOL(AE,AB,4,0,9HAIR TEMP,0,9)
CALL SYMBOL(AE,AC,4,0,9HDLW POINT,0,9)
CALL SYMBOL(AE,AD,4,0,9HCOLD NJ,1,0,9)
CALL SYMBOL(AE,AF,4,0,9HCOLD N),2,0,9)
AVER=AV(1)
CALL NUMBER(AR,AB,4,0,AVER,0,1)

```

```

AVER=AV(2)
CALL NUMBER(AR,AC,400,AVER,00,1)
AVER=AV(3)
CALL NUMBER(AR,AL,400,AVER,00,1)
AVER=AV(4)
CALL NUMBER(AR,AF,400,AVER,00,1)
24 CONTINUE
107 CALL PLTEND
STOP
END
SUBROUTINE SALLY(X,ND,AVER,SD,VMIN,VMAX)
DIMENSION X(500)
TOTAL=0.0
AVER=0.0
QC=FLOAT(ND)
SD=0.0
VMIN=1.0075
VMAX=-1.0075
DO 7 J=1,ND
TOTAL=TOTAL+X(J)
IF(X(J)-VMIN) 3,4,4
3 VMIN=X(J)
4 IF(X(J)-VMAX) 5,5,5
5 VMAX=X(J)
6 SD=SD+X(J)*X(J)
7 CONTINUE
AVER=TOTAL/QC
SD=SQRT(ABS((5-TOTAL*TOTAL/QC)/(QC-1.0)))
RETURN
END

```

## 5. Beregning af kapillarledningstal

Programmet beregner og tegner kapillarledningstallets afhængighed af middelfugtindholdet.

Beregningen sker ved brug af 2. grads tilnærmelser for fugtfordelingerne og følger iøvrigt princippet vist i fig. 5.5. Resultater af beregningen kan f.eks. ses på fig. 5.20. Beregningen sker med spring på 1 mm gennem hele prøvelegemets tykkelse.

### INPUT

READ 9

n-gange format 26 eller 27

### OUTPUT

Plot se fig. 5.20.

Print af de beregnede værdier med 5 mm's spring gennem prøvelegemet i et skema med øverst tiderne, hvorimellem der regnes ( $t_1$  og  $t_2$ ).

Derunder stedet i prøvelegemet, fugtindhold til tiden  $t_1$  og tiden  $t_2$ , derefter middelfugtindholdet og nederst kapillarledningstallet i  $\text{m}^2/\text{h}$ .



```

      N=52-1
32  R(N)=(G(N)+G(N+1))*0.05+R(N+1)
      DO 33 I=1,51
          G(I)=(C(I)+D(I))/2.0
          Y(I)=R(I)/(H(I)*100.*TIME*100.)
          Z(I)=-100.*R(I)/(H(I)*TIME)
          IF(Z(I).GT.1000.)Z(I)=1000.
          IF(Z(I).LT.1.)Z(I)=1.0
33  Z(I)=ALOG10(Z(I))
      WRITE(6,11) H1,H2
11  FORMAT(1H0,10X,11HFROM TIME =,F6.1,6H TO =,F6.1,11H)
      WRITE(6,17)(X(I),I=1,40,5)
17  FORMAT(2H0X,1P10E13.5)
      WRITE(6,18) (C(I),I=1,40,5)
18  FORMAT(2H0A,1P10E13.5)
      WRITE(6,19) (D(I),I=1,40,5)
19  FORMAT(2H0B,1P10E13.5)
      WRITE(6,20) (G(I),I=1,40,5)
20  FORMAT(2H0M,1P10E13.5)
      WRITE(6,21) (Y(I),I=1,40,5)
21  FORMAT(2H0D,1P10E13.5)
      CALL KURVE(G,Z,*S,1,20,900,00,00,-1,0,100)
      H1=H2
      X0=X1
      DO 22 I=1,4
22  A(I)=B(I)
      GO TO 3
105 CALL PLTEND
      STOP
      END

```

6. Beregning af kondensation i et tag

EDB-programmet følger den beskrivelse, som gives i afhandlingsens afsnit 7.

INPUT

- |               |   |
|---------------|---|
| 1. kort.      | I3 et tal for beregningens nummer<br>17A3 overskrift  |
| 2.-10. kort.  | format 8F8.3 $10^{-6}$<br>$D_{\theta}$ [ $m^2/h$ ] 0-10%vol i 0,25%vol spring<br>10-40%vol i      1%vol spring<br>ialt 71 værdier |
| 11.-19. kort. | format 8F8.3 $10^{-8}$<br>$D_T$ [ $m^2/h \text{ } ^\circ C$ ] inddeling som $D_{\theta}$  |
| 20.-28. kort. | format 8F8.3<br>$\varphi$ [-] (sorptionskurve) inddeling som $D_{\theta}$   |
| 29.-37. kort. | format 8F8.3<br>$p'$ [ $N/m^2$ ] 0-10 $^\circ C$ i 0,25 $^\circ C$ spring<br>10-40 $^\circ C$ i      1 $^\circ C$ spring          |
| 38.-46. kort. | format 8F8.3<br>$\lambda$ [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ] inddeling som $D_{\theta}$  |
| 47. kort      | 12F6.1<br>månedsmiddeltemperaturer (udvendigt) [ $^\circ C$ ]   |
| 48. kort.     | 12F6.1<br>månedsmiddeltemperaturer (indvendigt) [ $^\circ C$ ]  |
| 49. kort.     | 12F6.1<br>månedsmiddeldugpunkt (indvendigt) [ $N/m^2$ ]   |
| 50. kort.     | 12F6.1<br>månedsmiddeldugpunkt (indvendigt) [ $N/m^2$ ]<br>maksimalværdier i kortere perioder                                     |
| 51. kort.     | I3 antal lag i taget<br>I3 startmåneden (1-12)<br>I3 slutmåneden (evt. over 12)   |

F10.4 fugtovergangsmodstanden  
 $\beta$  [ $\text{m}^2 \text{h kg}$ ]  $10^{-7}$   
 F5.1 tidsspring mellem hver beregning  
 F5.1 antal timer, hvor maksimale dug-  
 punktsværdier optræder [h]  
 F5.1 indvendig varmeovergangsmodstand  
 $\alpha$  [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ]  
 F5.1 udvendig varmeovergangsmodstand  
 $\alpha$  [ $\text{W/m}^2 \text{K}$ ]  
 F5.1 tykkelsen af hvert lag [m]  
 52. kort. 8F8.3  
 fugtindholdet i hvert lag i [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

#### OUTPUT

Print af indlæste data og beregnede fugtfordelinger, se fig. A.4.

WRITE 1

kort i format 30 med 5 lag kan derved optegnes som vist i fig. 7.5. - 7.15.

[illegible]

520 HEREWING AF FUGT I TAGE

Fig. A.4. Udskrift af EDB-program til beregning af fugt i tage.

Print of computer program for calculation of moisture in roofs.



```

DIMENSION MTE(12),MTI(12),MCI(12),MCIP(12),DC11(301),DC22(302),RVC
1(301),XABLAT (301),DC1(301),DC2(301),RV(301),CMAX(301),TETA(50)
DIMENSION TX(50),QR(20)
REAL MTE,MTI,MCI,MCIP
INTEGER DIKTE,DIKMIN,RECDIK,START,EINDE,D,HH
AMCAN=0.0
READ(5,20) MC,(QR(N1),N1=1,17)
20 FORMAT(13,17A3)
N1=9
CALL EES(DC11)
CALL EES(DC22)
CALL EES(RV0 )
CALL EES(CMAX)
CALL EES(XABDAT)
READ (5,1)(MTE(K),K=1,12)
1 FORMAT(12F8.1)
READ (5,1)(MTI(K),K=1,12)
READ (5,1)(MCI(K),K=1,12)
READ (5,1)(MCIP(K),K=1,12)
READ (5,2) DIKTE,START,EINDE,BETAK,STAB,PIEK,R1,RU,DX
2 FORMAT(3I5,F10.4,5F8.1)
WRITE(6,111)(MTE(K),K=1,12)
WRITE(6,111)(MTI(K),K=1,12)
WRITE(6,111)(MCI(K),K=1,12)
WRITE(6,111)(MCIP(K),K=1,12)
111 FORMAT(1H0,12F10.1)
WRITE(6,57)DIKTE,START,EINDE,BETAK,STAB,PIEK,R1,RU,DX
57 FORMAT(1H0,10X,3I10,6F12.4//)
WRITE(6,58)MC,(QR(NG),NG=1,17)
58 FORMAT(1H0,15,17A3//)
BETA=BETAK/1000000.0
READ (5,3) (TETA(K),K=1,DIKTE)
3 FORMAT( 8F8.3)
DO 17 K=1,DIKTE
17 TETA(K)=TETA(K)/100.
NTID=0
M1=IFIX(250.*(TETA(01)+TETA(02)+TETA(03)+TETA(04)))
M2=IFIX(250.*(TETA(05)+TETA(06)+TETA(07)+TETA(08)))
M3=IFIX(250.*(TETA(09)+TETA(10)+TETA(11)+TETA(12)))
M4=IFIX(250.*(TETA(13)+TETA(14)+TETA(15)+TETA(16)))
M5=IFIX(250.*(TETA(17)+TETA(18)+TETA(19)+TETA(20)))
WRITE(1,112)MC,NTID,M1,M2,M3,M4,M5
112 FORMAT(13,2H30,10,15X,14,4(7X,14))
WRITE(6,15)(TETA(K),K=1,DIKTE)
XD=1.0/DX
DIKMIN=DIKTE-1
RECDIK=1/DIKTE
PIEK=PIEK+0.005
C1=XD*XD*STAB/1000000.0
C2=C1/100.
C3=BETA*XD*STAB
DO 4 K=1,301
DC1(K)=C1*DC11(K)
DC2(K)=C2*DC22(K)
4 RV(K)=C3*RV0(K)

```

```

DO 5 M=START,FINDE,1
WRITE(6,9000) 4
9000 FORMAT(15)
N=M-12*10 (X (M/12+1)
C1=C3*MC1(N)
CIP=C3*MCIP(N)
TIN=NTI(N)
T=TIN-MTE(N)
HEATRE =R1+RU
DO 6 K=1,DIKIE
Q=20000*TETA(K)+10
J=IFIX(Q)
A=XABOAT(J)
TX(K)=DX/A
6 HEATRE =HEATRE +TX(K)
GRAD=T/HEATRE
DO 7 K=1,DIKIE
W=TX(K)
7 TX(K)=W *GRAD
TXQ=R1+GRAD
WRITE(6,9001)(TX(K),K=1,DIKIE),TXQ
9001 FORMAT(10X,12F5.2)
TOPP=FIN-TXQ
B=2000*TOPP+10
J=IFIX(B)
C4=CMAX(J)+(B-J)*(CMAX(J+1)-CMAX(J))
B=20000*TETA(1)+10
L=IFIX(B+10B)
C5=RV(L)
C5=C5+(B-L)*(RV(L+1)-C5)
DO 8 D=1,50
NT=NT+1
HEATRE =R1+RU
DO 9 K=1,DIKIE
Q=20000*TETA(K)+10
J=IFIX(Q)
A=XABOAT(J)
TX(K)=DX/A
9 HEATRE =HEATRE +TX(K)
GRAD=T/HEATRE
DO 10 K=1,DIKIE
W=TX(K)
10 TX(K)=W *GRAD
TXQ=R1+GRAD
TOPP=FIN-TXQ
B=2000*TOPP+10
J=IFIX(B)
C4=CMAX(J)+(B-J)*(CMAX(J+1)-CMAX(J))
TIDJ=C0
10 TIDJ=TIDJ+STAR
IF(TIDJ.GT.240001) GO TO 14
A=TETA(1)
AA=20000*AA+10
L=IFIX(AA)
C5=RV(L)
C5=C5+(AA-L)*(RV(L+1)-C5)
IF(TIDJ.LT.0PIK) GO TO 11
OTD=C1-C4*C5
GO TO 12

```

```

11 DTQ=CIP-C4*CE
12 CONTINUE
   DO 13 K=1,D1KMIN
      B=TETA(K+1)
      AA=1000.0*(A+B)+1.0
      J=IFIX(AA)
      DC=DC1(J)
      DC=DC+(AA-J)*(DC1(J+1)-DC)
      DTK=(A-B)*DC+TX(K)*DC2(L)
      TETA(K)=A+DTQ-DTK
      A=B
      Q=2000.0*A+1.0
      L=IFIX(Q)
13 DTQ=DTK
   TLTA(D1K+1)=TETA(D1KTC)+DTQ
   GO TO 16
14 CONTINUE
   IF(N1.0.0.5) GO TO 12
   GO TO 8
15 CONTINUE
   TMEAN=0.0
   DO 21 K=1,D1KTC
21 TMEAN=TMEAN+TETA(K)
   TMEAN=TMEAN/D1KTC
   NTID=NTID+50
   M1=IFIX(250.0*(TLTA(01)+TETA(02)+TETA(03)+TETA(04)))
   M2=IFIX(250.0*(TLTA(05)+TLTA(06)+TETA(07)+TETA(08)))
   M3=IFIX(250.0*(TLTA(09)+TETA(10)+TETA(11)+TLTA(12)))
   M4=IFIX(250.0*(TETA(13)+TETA(14)+TETA(15)+TLTA(16)))
   M5=IFIX(250.0*(TETA(17)+TLTA(18)+TETA(19)+TETA(20)))
   WRITE(1,112)M0,ITID,M1,M2,M3,M4,M5
   WRITE(6,15){TETA(K),K=1,D1KTC},TMEAN
16 FORMAT(10X,12F8.5)
   DIP=ABS(AMEAN-TMEAN)
C   IF(DIP*.1F.0.000001) GO TO 55
   AMEAN=TMEAN
   N1=0
8 CONTINUE
5 CONTINUE
   GO TO 100
C 55 CONTINUE
C   WRITE(6,56)
C 56 FORMAT(1H, //11H CONVERGENT)
100 STOP
END
SUBROUTINE L13(AN)
  DIMENSION ARR(1:1),HULP(71)
  READ(5,1) (HULP(K),K=1,71)
1 FORMAT( 3F8.7)
  WRITE(4,4) (HULP(K),K=1,71)
2 FORMAT(10X,10F10.4)
  DO 2 K=1,40
    A=HULP(K)
    B=0.2*(HULP(K+1)-A)
    M=C4K-5
    DO 3 L=1,5
      ARR(M+L)=A+(L-1)*B
    N=0
    DO 3 K=41,70

```

```
N=N+1
A=HULP(K)
B=0.05*(HULP(K+1)-A)
M=2.0*N+1.50
DO 3 L=1,20
3 ARR(M+L)=A+(L-1)*B
ARR(50)=HULP(71)
RETURN
END
```

